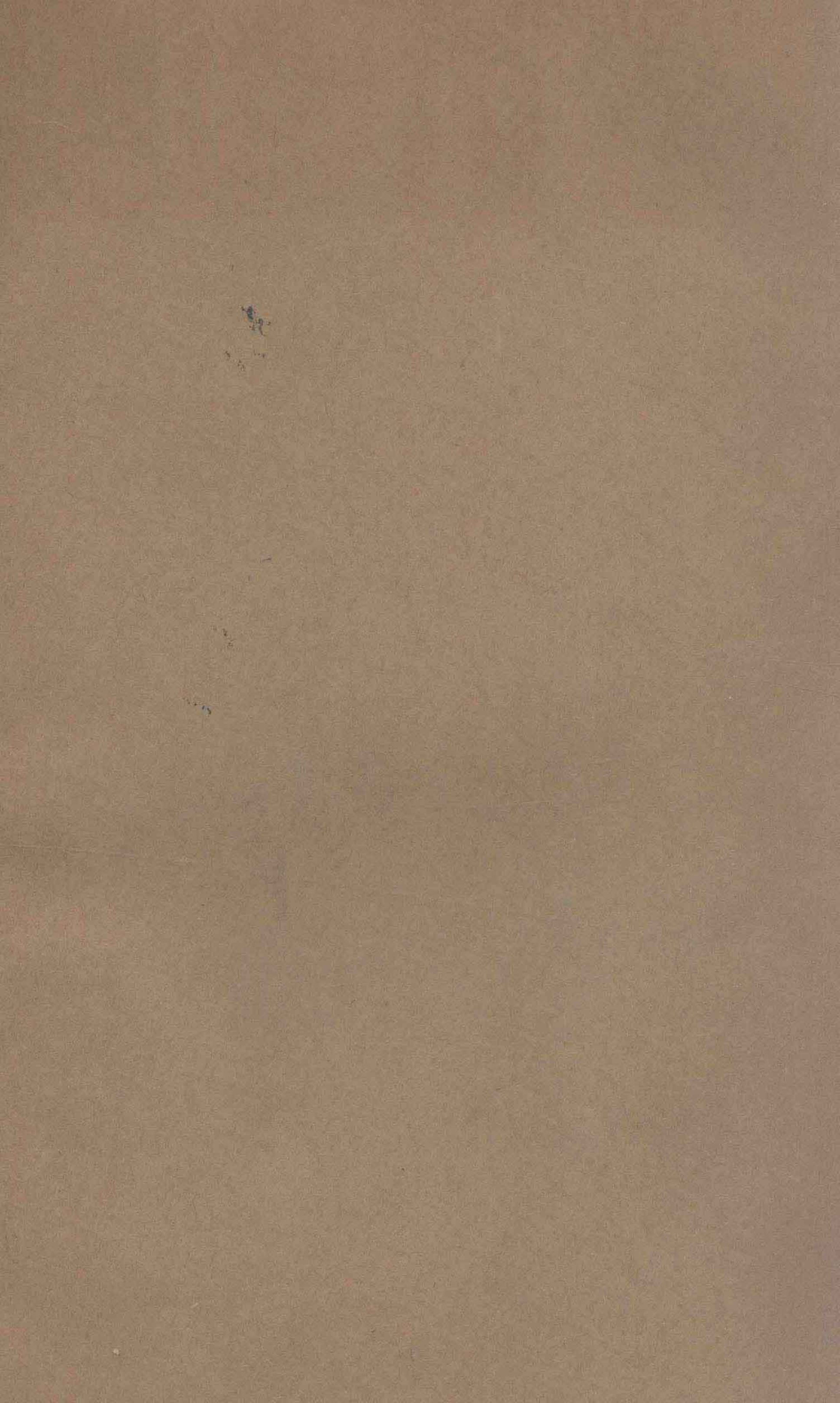
音學



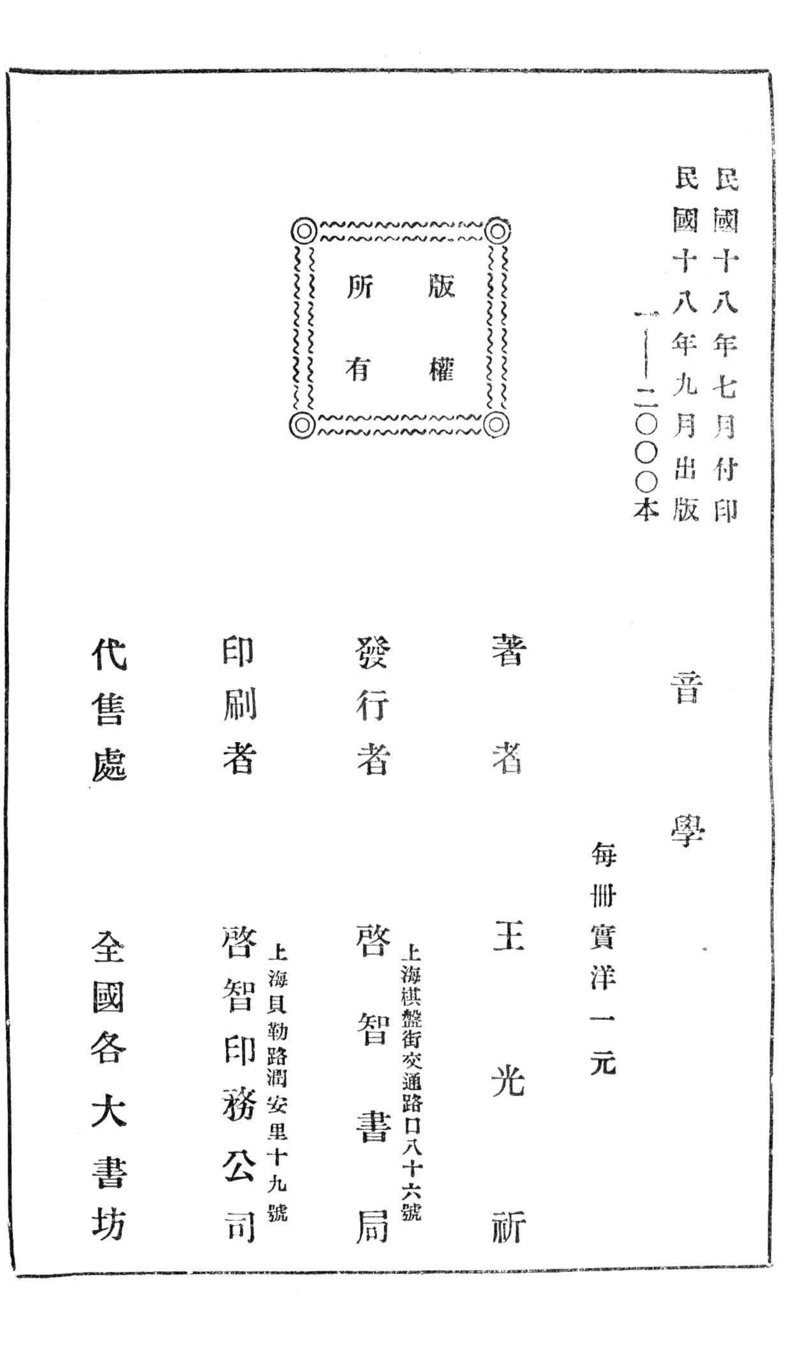
音學

王光祈著

上海

啓智書局印行

1929



民國十八年七月付印
民國十八年九月出版
一——二〇〇〇本

音學

每冊實洋一元

著者　王光祈
發行者　啓智書局　上海棋盤街交通路口八十六號
印刷者　啓智印務公司　上海貝勒路潤安里十九號
代售處　全國各大書坊

音學

自序

我們研究音樂之法。約有兩種。一係從美術方面着眼。如講求音樂作品美惡之類是也。一係從科學方面下手。如討論聲音成立原因之類是也。

惟『音樂作品』是含有『民族性』的。換言之。各民族之生活習慣，思想信仰，既各有不同。其所表現於音樂之中者，亦復因而互異。甲民族之樂，乙民族不必能懂。乙民族之樂，丙民族亦未必能懂。此所以今日吾國萬事皆欲歐化。而獨對於西洋音樂，却始終是不敢承教。反之。討論聲音成立原因之『音學』。則却是含有『國際性』的。換言之。我們若從物理上，生理上，及心理上，去研究聲音成立傳播之道，却是毫無民族界限爲梗的。只要彼此所用的科學方法不錯。則其結論未有不同的。

西洋近代因科學發達之故。所以音樂方面亦大受其賜。譬如他們因爲『物理學』研究得好。所以他們的樂器製造，舞台建築。皆有相當的進步。因爲他們『生理學』研究得好。所以關於歌喉之訓練，亦較中國伶人爲合理。因爲他們『心理學』研究得好。所以對於音之協和關係，皆常有深切之講求。至於吾國今日學術，處處皆落人後。實已無可諱言。故有志之士。無不競言西洋科學。只可惜所競言者，尙多囿於『應用科學』一途。而對於一切學術所基之『純粹科學，』則習之者反寥寥。譬如現在柏林大學之物理一科，爲世界冠。而中國人在此專習該科者則殊不多覯。此亦吾國學術界不思樹本之一證也。

中華民國十五年三月十七日王光祈序於柏林 Steglitz, Adolfstr, 12。

著者附白。　在著者前此各種著作中。凡關於發音之討論，如有顯與本書不合者。請以本書爲準。因本書所採各種學說，較爲新出且精審故也。

音學

——目次——

中編　從生理上觀察

下編　從心理上觀察

音學

王光祈

上編　從物理上觀察

（一）　音之發生由於顫動

音之發生，係由於一種物質的顫動。此種物質，無論其爲固體的，液體的，或氣體的，皆可。其顫動之原因，係由於該項物質偶爲一種外力所掀動。但既動之後，該項物質又欲由動狀依然回到他的原來靜態。於是擺來擺去，以求靜止。因爲這種擺來擺去的原故。所以發出聲音。

這種擺來擺去的狀況。頗與我們壁鐘之內，那個墜子左右搖擺一樣。現在我們且舉一例如下。

假如我們在室內天花板之下。懸上一根繩子。繩端下垂。並在端頭，繫上一個鉛

錘。因而這根繩子筆直下垂，一點不動。現在我們用手將鉛錘向右一拉。隨卽將手放開。於是那個鉛錘初到右邊『極點』Endlage 之時。受『惰性律』Tragheitsgesetz 的支配。一時略呈靜態。但是後因『重力作用』Schwerkraft 發生之故。鉛錘遂不得不逐漸下墜。『重力作用』愈來愈大。所以鉛錘下墜之速度，亦愈來愈大。到了原來『靜點』Ruhelage（按卽當初鉛錘尚未擺動時所在之點）之時。其速度 Bewegungsgeschwindigkeit 亦恰是漲至『最大』Maximum 之際。因爲『速度正値』最大之際。要他臨崖勒馬。實是狠不容易。所以那個鉛錘一直經過原來『靜點』毫不停留。跑到左邊去了。當他正向左邊上升時。『重力作用』又把他拚命的往下拖他既受了這種牽掣。所以不能任性上升。待至升到左邊『極點』時。（其高度與當時右邊之高度相等。）始略爲休息。又重新往下墜去。如是者左右往來若干次。一直等到他的『動力』Bewegungsenergie 受種種『自然阻礙』Naturlicher Widerstand。最後精疲力盡。始歸原來『靜點』，不復再動了。現在我們且繪一圖如下。

附圖一

圖中，M是天花板下懸繩之處。C是鉛錘最初未動時所在之『靜點』。MC那根直線是代表繩子。A與B兩點是那個鉛錘向左右兩邊擺動時所達到之『極點』。

(二)動程顫動數顫動期

上列附圖一。從C到B，稱爲『動程』Schwingungsweite。(或稱爲Amplitude。從C到A亦然。至於『動程』大小，我們可以任意爲之。譬如我們當初手拖鉛錘時。僅僅拖到P點而止亦可。或竟超過B點亦無不可。

凡鉛錘從B跑到A，復從A回到B一次。統稱爲顫動一次。(係照德國學者計

算法。）將一秒鐘內之顫動次數合計起來。是爲『顫動數』Schwingungszahl，但法國學者計算顫動次數係以由B到A爲一次。由A到B又爲一次。因此之故我們稱呼法國計算法爲『單顫動』Vibrations simples。（簡寫則爲V. S.）德國計算法爲『複顫動』Vibrations doubles。（簡寫則爲V. d.）換言之。法國『顫動數』常較德國大一倍。譬如a音之『顫動數。』在法國則稱爲870。在德國則稱爲435。

每完成一次顫動所需要之期間稱之爲『顫動期』Schwingungsdauer『顫動期』與『顫動數』成反比例。換言之。鉛錘擺動愈慢，則每一次顫動所需要之『顫動期』愈久因而每秒鐘內所成就之『顫動數』亦愈少。反之。鉛錘擺動愈快，則每一次顫動所需要之『顫動期』愈短。因而每秒鐘內所成就之『顫動數』亦愈多。

（三）　音之高低與强弱

音之高低，係以『顫動數』多寡爲轉移。換言之。每秒鐘內顫動次數愈多者，則其音愈高。反之。顫動次數愈少者，則其音愈低。大約通常能聽之音其最高者爲每秒

鐘內複顫動二萬次左右其最低者爲十六次左右。

音之强弱，係以『動程』大小爲轉移。換言之。『動程』愈大者，則其音愈强。『動程』愈小者，則其音愈弱。譬如上列附圖一。由C到B之『動程』，大於由C到P之『動程』因而前者之音强而後者之音弱。

本來『動程』大小與『顫動期』有關。因而與『顫動數』亦有關。換言之。『動程』愈大時，則每次顫動所需之『顫動期』愈久。因而每秒鐘內所得之『顫動數』亦愈少。反之。『動程』愈小時，則每次顫動所需之『顫動期』愈短。因而每秒鐘內所得之『顫動數』亦愈多。但在『音學』之上。所用『動程』，類皆極小。卽或偶有增減。對於『顫動數』方面，亦無十分重要影響。因此之故。通常計算『顫動數』時。往往不管『動程』大小如何。

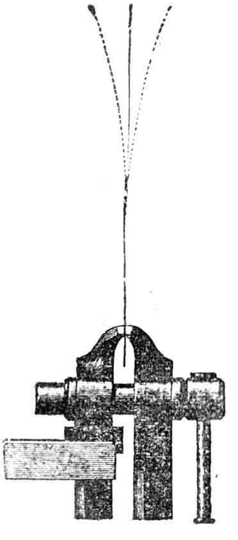
(四) 發音之物質

上面所舉繩錘擺動之例。最足以『形容』發音原理。但其功效亦只限於『形

容』二字而已。因爲上面所舉繩錘擺動之例。發音甚低。非我們尋常人耳朵所能聽出。假如我們要使繩錘擺動之音升高。以便耳朵能夠聽出。則事實上非將繩錘長度，減至半個『公分』Centimeter(西洋一個公分等於中國三分二厘四毫)不可。但是這樣一來。所發之音雖已升高，足使耳朵能聽。而音之强度則仍嫌太弱，不能充分聽出。故繩錘擺動之例。只足以拿來『形容』音之顫動原理。却不能拿來實地『試驗』音之顫動。假如我們要實地試驗音之顫動。還須另尋他種物質。

(甲)我們用銅竿一根。其形細而且將長。其下部緊緊插入鐵座之中。使之豎立不動。更於竿之尖端，擬置銅丸一枚。然後用手再將銅丸向右一掀。於是銅丸立刻擺動。左右往來不已。其式如下。

附圖二



此種擺動之所以成立。誠然仍是一種『力』的作用。但不是『重力』Schwerkraft。(如前面所舉繩錘擺動之例。)而是『彈力』Elastizitat。關於『彈力』之說明。將於下面第(五)節內詳之。此處姑且不論。

當我們初將銅丸向右掀去之時。那根筆直銅竿。不免隨之向右彎曲幾許。但是竿子內部之『彈力』要想依然回復他原來那種筆直形狀。於是拚命跑回原來『靜點』Ruhelage。而且愈跑愈快。當其跑到『靜點』之時。跑的『速度』，亦正是達到最大之際。因此之故。停勒不住。一直跑到左邊去了。但是現在『彈力』又復大顯神通。緊緊把他(銅丸)拖住。所以當他向左邊擺去時。其『速度』乃不得不愈來愈慢。待到跑至左邊『極點』Endlage之際。稍爲停頓。又復退回。如是者左右往來若干次。一直到了他的『動力』既竭。復歸原來筆直形狀。然後才心安意得。

這種銅竿試驗，確是很簡單。而且竿子形狀，無論其爲圓的，或是方的。均無不可。只是有一件事要注意。即竿子愈長，則其顫動之跡，愈顯而易見。但是由此所發之音，

却狠難聽出。反之。桿子愈短，則其顫動之跡，愈不易看見。但是由此所發之音，却可以聽出。要想調和其中，同時能看復能聽。則須另尋一種東西代替。請讀下面（乙）項便知。

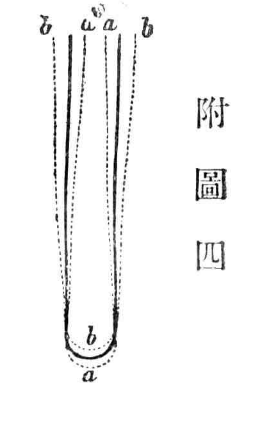
（乙）設有一個長方形的鋼片於此。（不要太厚。）我們設法使之顫動。則其顫動之迹與夫顫動之音，均可看見與聽出。

（丙）假如我們將一根筆直的，長方形的鋼條。使之彎曲成一U形。如下列附圖三所示者然。其後再將鋼條之一端，自外敲擊一下。使與其他一端對撞。於是立刻兩端皆開始顫動。其顫動形式，係兩端時而彼此同向內方接近。（如附圖四中之a a然。）時而彼此各向外方奔去。（如附圖四中之b b然。）總而言之。鋼條本身幾乎全體皆在顫動。甚至於下面彎曲部分亦復隨之共同顫動。但是其中却有兩點穩如泰山。安然不動。此兩點爲何。按卽附圖四內a虛線與b虛線彼此交叉之處。卽『音學』上所謂『結點』Knotenpunkte者是也。（關於『結點』之說明。當於後面第

第二十一節內詳之。)

附圖三

(丁)絃上發音，亦是同樣道理。不過絃的物質，(無論其爲金屬的，或其他物質的。)往往太長太細或太軟。其勢不能自行顫動，如上面所述之銅竿鋼片然。所以我們必須把他兩端扣住。筆直的緊張起來。使其自身具有一種『彈力』。然後再將絃



附圖四

身向右擊一下，或拉一下。於是該絃立刻在右邊成一曲形。因爲他的『彈力』要想依然囘復原來那種筆直的狀態。所以他拚命的跑囘。而且愈跑愈快。等到他跑囘原來筆直狀態之時。正是他的速度達到最大之際。因而停勒不住。又跑到左邊去了。但是此時『彈力』作用又緊緊的把他拖住。於是他愈跑愈慢。一直待至左邊既成曲形之後。又復開始跑囘。如是者左右往來若干次。最後乃恢復原來筆直狀態。總之除了兩端扣住之點外。所有全絃，皆因此一擊或一拉之故，陷於顫動。由此以產出聲音。大凡較長之絃，發音較低。但顫動之迹。却同時可以看見。不過此處所謂『看見』僅指顫動大概狀況而言。至於或左或右之單獨次數。究嫌太快。仍非吾人眼目所能看出也。

(戊)此外如鼓上之皮，或張或弛。笛內之風，或鬆或密。皆爲成聲之理。然考其原因。莫不由於往來顫動之故。即以手拭杯或以錘擊木。其發音之道，亦無不如此。(其詳當於後面補述。)故我們因此可以下一簡單定義曰。凡音之成均係由於某種物

質，既受外力掀動之後。因欲恢復原來靜態之故。所以往來顫動。因而發出聲音。

（五）彈力之種類

我們從物理學上。知道一切物質之內容。皆係由於無數『分子』Molekule集合而成。並且各個『分子』之間。常有空隙相隔。一如各種行星之浮於空際。然此種『分子』具有兩種反對性質。一曰『吸力』。二曰『拒力』。假如莫有『吸力』那麼。各個『分子』將分道而馳。各奔東西。斷不能相集而形成一種物體。反之只有『吸力』而無『拒力』。則各個『分子』勢將彼此緊貼。弄成一團。不容有所謂『空隙』者存在。因此之故。『吸力』與『拒力』必須互相爲用。然後各種物質始能分別存在。

物質『吸力』實有狠大的力量。譬如我們在天花板下。懸一銅竿，這個銅竿上半節中的『分子』。不但能將該竿下半節中的『分子』吸住，使其不致解體。而且有時卽或在竿子下端，再掛上一個相當鐵錘。而竿中『分子』亦復可以互相吸住，

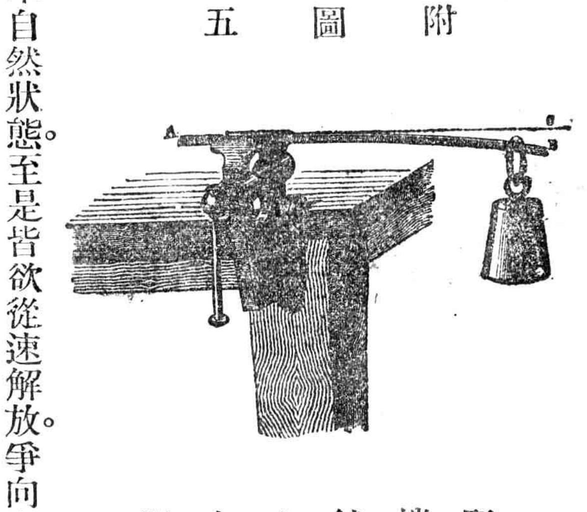
不致碎斷。

但是竿中『分子』因彼此相吸之故。雖可以載重而不碎斷。然在竿子形式方面，則有時却因此而變其狀態。換言之。竿子下面因有重物相墜之故。於是竿子形式遂不免因而拉『長』與變『細』。老實說來。便是竿中『分子』，爲外界重力所拉。彼此距離不得不暫爲疏遠。所以竿子形式，變爲長細。一旦外界重力既去則竿中『分子』因『吸力』作用之故。彼此之間仍然恢復原來距離。因此之故竿子形式依然回復原來長大之狀。這種伸長縮短之彈力。叫做『伸縮彈力』Zugelastizitat。

假如我們有一鋼條。將其一端橫繫於棹邊。其他一端則橫在空中。並懸一鐵錘於上。如下列附圖五中所示者。然則鋼條之原來筆直形狀AC。因受鐵錘下墜之故。不免下垂。變成AB曲形。換言之。鋼條上層之『分子』，各自遠開，因而條子上層變『長』。鋼條下層之『分子』各自擠緊。因而條子下層變『短』。假若一旦鐵錘取開。則鐵條上層之『分子』依然接近。而下層之『分子』亦依然分開。於是鐵條原

來筆直形式，依舊囘復。這種既曲復直的彈力。叫做『曲直彈力』Biegungselastizitat

附圖五



假如我們有一根細長鋼條。將其豎立。條之上端，嵌一平面鋼板條之下端，穩以鐵座。如下面附圖六中所示者然。現在我們用手將那個平面鋼板向右旋轉一下。於是下面那個鋼條，立刻由下至上成一螺旋扭緊之狀。然後我們再將雙手離開平面鋼板。於是鋼條本身所有『分子』前此因受外力所造成之不自然狀態。至是皆欲從速解放。爭向左轉。以便囘復原來靜狀。這種左右旋轉之彈力。叫做『旋轉彈力』Torsionselastizitat。

附圖六

(六)由各種彈力所發之音

由『伸縮彈力』所產出之音。叫做『直線音』Longitudinaltone。換言之。銅竿中之『分子』忽上忽下，忽鬆忽緊。因此陷於伸縮顫動。發出聲音。

由『曲直彈力』所產出之音。叫做『曲線音』Transversaltone。換言之。銅條外層『分子』時常鬆緊不同。若這面一層之『分子』擠緊則那面一層之『分子』變鬆。反之若這面一層之『分子』放鬆。則那面一層之『分子』又擠緊。因此陷於搖擺顫動。發出聲音。

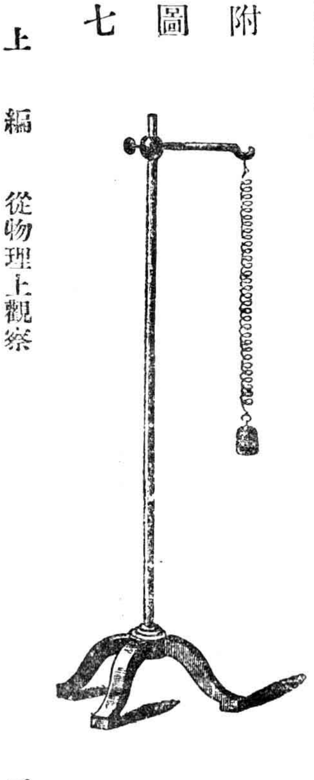
由『旋轉彈力』所產出之音。叫做『旋轉音』Torsionstone。換言之。鋼條中之『分子』因受外力扭轉，造成一種不自然狀態。現在亟欲解放，還其本來面目。所

以陷于旋轉顫動因而發出聲音。

現在我們再製造一種儀器可以同時試驗上述三種彈力。(請參觀下列附圖七。)假如我們把那個鉄錘往下一拉。於是那根螺旋式鋼絲，立刻忽上忽下的跳舞起來。是卽所謂『伸縮彈力。』假如我們把那個鉄錘向右一掀。於是那根螺旋式鋼絲，立刻忽左忽右的搖擺起來。是卽所謂『曲直彈力。』假如我們把那個鉄錘向右一搓。於是那根螺旋式鋼絲，立刻忽左忽右的扭轉起來。是卽所謂『旋轉彈力。』

在音樂實際用途上，以『直線音』及『曲線音』兩種爲最重要。至於『旋轉音』則關係較少。

附圖七



（七） 音波與空氣

物質顫動，乃成聲音。已如上面所述。但是假如其間沒有空氣爲之傳播。則音波亦無從流入我們的耳鼓。

誠然我們有時亦可以直將耳朵緊接一種樂器『響板』Resonanzboden 之上。不用空氣介紹。已能聽出聲音。但是這種情形，總算特別例外。至于普通傳播音波之法。終是利用空氣。

假如我們置一銅鐘於空氣稀少之玻璃箱內。則其所發之音，將遠較露天之下所發者爲弱。假如我們再用『排氣機』將箱內所有空氣一齊排去。則銅鐘所發之音，勢將絲毫不能聽出。此其故，無他。因爲其中缺乏空氣『分子』，將該音傳至玻璃板上。再由玻璃板傳至外間，以流入吾人耳鼓，故也。

我們要了解空氣傳播音波之理。最好是以銅片彈簧爲例。當其銅片最初向右顫動之時。所有原來布在銅片右邊平面上之空氣『分子』。皆一時互相擁擠起來。

但既經擠撞之後。又復立刻分向四面奔去。因爲這一奔的原故，又與鄰近周圍一層的空氣『分子』相撞。於是此層被撞之空氣『分子』。又更向其他隣近一層空氣『分子』撞去。如是者一層又一層的撞去一直撞到我們耳鼓。

因爲空氣『分子』是向周圍『撞去』。所以周圍空氣『分子』演成一種『濃密作用』Verdichtung。而且形成一個球狀。愈來愈大。（請參看下列附圖八）

但是銅片現在忽然轉向左邊顫動。於是前此空氣濃密之處，至是忽變成稀薄。此層空氣既成稀薄之後。所有其他隣近之外層空氣，又不得不暫時向內退回，以補其缺。因此之故，所有原來周圍濃密空氣『分子』，皆各自奔向隣近內面一層，補填空隙。又成一種『稀薄作用』Verdunnung。

假如那個銅片，繼續左右顫動不已。則該片四圍空氣，便成爲一種忽濃忽薄之球形。分向四圍擴大不已。

下列附圖八。卽表示音波傳播之狀。圖中有銅鐘一。因顫動而發出音波。其狀如

球。（按下列圖中只繪球形斷面，以便觀察，若就眞正實情而論，則銅鐘應包在球心之中。如菓之有仁，非外面所能看見也）愈來愈大，時濃時薄。一直傳入吾人耳鼓。我們細看圖中波影。其距銅鐘愈近者。則其濃薄兩色皆愈分明。愈遠者則其濃薄兩色亦愈難分。此其故無他。因爲音波初發。其力甚强。衝撞最烈。故隣近空氣激盪特甚。濃薄極顯。其後音波之球形愈來愈擴大。其衝撞空氣之力亦愈來愈薄弱。故距銅鐘愈遠者，激盪愈小。因而濃薄兩色，相差皆不甚遠。

附圖八

因爲音波之球形擴大，足以減少『彈力』Schalleneygie。所以我們假如所立地

點，距發音之處太遠。則其結果將毫無所聞。但有一法足以補救。即是利用一根細而且長的筒子。使音波一直傳入筒內。無法分向四圍擴大，以減少其『音力』。因此之故。我們雖立在較遠之地。亦常能聽出。

（八）直線音波之動狀

我們對於音波之計算方法。係以『濃』與『薄』兩層總共算爲『一個音波』。（請參看上列附圖八。）大凡一種聲音由產音之地發出後。其間必有無數音波，一層又一層的分向四圍擴去。一直等到『音力』漸漸衰憊，然後歸於消滅或偶遇中途障碍，因而折轉囘來。（關於『囘聲』之說明，後面再詳。）總之。音波在空氣中之進行。始終是一濃一薄之現象。換言之。便是『空氣分子』一伸一縮之顫動作用。因此之故。所有一切『空氣分子』之顫動形式，皆應列入『直線音波』Longitudinalween一類。

不但氣體如此。即液體內部顫動，亦無不如此。譬如我們投石於水。忽見外部水

面，波瀾起伏。似乎近於『曲線音波』Transnersalwellen。吾人若就水之內部『分子』一爲觀察，則仍是一伸一縮之顫動。

不但氣體液體如此。卽固體物質之顫動，有時亦是『直線音波。』譬如我們有一根棍子。而且假定這根棍子的內部。彷彿是無數薄片由甲端累至乙端所組織而成。現在我們在甲端用錘擊一下。那麼甲端第一層薄片立刻向第二層薄片壓迫。第二層復向第三層壓去。如是者一層又一層的一直壓到棍子乙端的最終一層這種作用卽是上面所謂『空氣分子』顫動中之『伸的作用，』或『濃密作用。』但是當其錘子離開甲端之時。甲端第一層薄片因受第二層薄片之『拒力作用』立刻向後退回。而且退的太猛，一直超過原來『靜點』。於是第一層與第二層相拒之空間，反較原來（未擊以前）空間爲大。同時第二層薄片當然受第三層薄片之『拒力作用，』復向第一層薄片退回。如是者一層又一層的陸續向後退回。這種『退的作用，』卽是上面所謂『空氣分子』顫動中之『縮的作用，』或『稀薄作用。』總而言之。固體物質有時

亦是『直綫音波』。

現在我們再繪一圖，以說明『直綫音波』之進行。下列附圖九中 a b c ……r 等等小字母，是代表棍中分子圖中第一橫行（A），是棍子在未擊以前之靜態。第二橫行（B），是甲端 a 層已受錘擊之後拚命向 b c 各層擠去之狀。第三橫行（C），是錘子離開甲端 a 層以後，a 層因受 b 層之『拒力作用』，開始向後退回之狀。第四橫行（D），是 a 層退的太猛，超過原來『靜點』之狀。（請與第一橫行 a 之地點對看）第五橫行（E），是 a 層又復轉身撞去之狀，要之圖中黑點直對着音波前進方向，或伸或縮，以成顫動。所以叫做『直綫音波』。

附圖第九

(A) a b c d e f g h i k l m n o p q r

(B) a b c d e f g h i k l m n o p q r

(C) a b c d e f g h i k l m n o p q r

(D) a b c d e f g h i k l m n o p q r

(E) a b c d e f g h i k l m n o p q r

（九）曲綫音波之動狀

上面所述『直綫音波』是一種『直綫式』的伸縮顫動。而且『分子』活動是筆直對着音波前進方向。此處所謂『曲綫音波』則是一種『曲綫式』的搖擺顫動。而且『分子』活動不是對着音波前進方向。譬如音波前進方向爲自左至右。而『分子』活動則係自上至下。現在我們且先舉一例以說明之。設有金屬長細條子一根。先將兩端扣住。使之左右緊張，成一橫線。然後在左端條子之下，用一鐵錘，向上一擊。於是條子左端，立刻高拱起來，成一凸形。而且這個凸形，並不從此罷休。更將陸續造成許多凸形，一直奔向條子右端而去。假如我們當初鐵錘打擊，是在左端條子之上，向下打去。那麼當然條子左端先成一個凹形。然後陸續再造許多凹形，一直奔向條子右端而去。

現在我們再繪一圖說明如下。附圖十中 a b c……t 等等小字母，是表示條子中的『分子』。第一橫行（A）是表示條子未受錘擊以前之靜態。第二橫行

(B)係表示鐵錘在條子左端之下向上一擊。因而 a b c d 各『分子』立刻拱起成一凸形之狀第三橫行(C)是條子『彈力』作用發生，a b c d 陸續向下退回而同時 e f g h 却受 d 之拖扯，向上奔去於是 a i 之間頓成一個半圓形狀第四橫行(D)因爲 a b c d 退的太猛，停勒不住，超過原來(未受錘擊以前)靜點，跑到條子下面去了。而同時 i k l m 四個分子又受 h 之拖扯，向上奔去。第五橫行(E) a b c d 現在又因『彈力』作用，轉身跑回原來『靜點』而同時 n o p q 又受 m 之拖扯，向上奔去。於是現在 i a 之間，成一凹形。i r 之間，成一凸形。我們統稱 a r 間之一凹一凸形狀爲『一個音波』。假如 a 之『彈力』猶未盡。那麼當然還要往上跑。而同時 r s t ……等等分子，亦當然受 q 之拖扯，先後向上奔去。如是者陸續向右演進。其結果所有右側未動之『分子』，一個一個的被拖上去製造凸形。

我們由此可以看出。a『分子』完成『一個顫動』時。(如第五橫行(E)所示)恰是『一個音波』作成之際。因此我們稱呼ae為『四分之一音波』。ai為『半個音波』an為『四分之三音波』。ar為『一個音波。』

附圖第十

現在我們再將附圖十，持與上節附圖九所謂『直線音波』者相較。便知兩者音波進行方向。雖皆自左至右。但是『直線音波』中之『分子』是向左向右伸縮顫動，與音波進行方向相同。而『曲線音波』中之『分子』則是向上下凸凹顫動，與

音波進行方向之由左至右者不同恰恰成爲一個交叉之形所以前者稱爲『直線音波』後者稱爲『曲線音波』

至於在附圖九中，『分子』若係向右擠時而在附圖十中，則多係向上跑在附圖九中若係向左退時而在附圖十中則多係向下跑總而言之『直線音波』與『曲線音波』大體皆相似不過『分子』顫動之時一則左右伸縮一則上下凸凹而已

（十）音波傳遞之試驗

我們日常傳遞音波之媒介物其最普通者莫如空氣無論兩人對話，或壁上鐘聲蓋無一不倩空氣爲之媒介所以我們用不着試驗比較少見的，要算是液體或固體傳遞音波之事所以特於本節略舉數例，爲之說明

假如我們將前面第（四）節內附圖四U形鋼條之上端，加一木柄，成爲U形現在我們再將鋼條兩端觸動使之發出聲音同時並將其懸諸空中於是該條所發之音，僅能於最近之處聽出倘若我們另將該條之木柄微與杯中所盛之水的面層相

接。則其音響，必較懸諸空中者爲大。此無他。因該條所發音波曾受面積較寬的水面爲之媒介，然後傳入空氣之中，故也。此外又常有西洋科學家於一個大湖之中。分駕甲乙兩船，各泊一方。由甲船之上沈一銅鐘於水內，使之敲擊發音。同時更由乙船之人，放一長聽筒於水中，坐在船上以聽之。此亦水能傳音之證也。

至于固體物質之傳音波，亦極容易試驗。譬如我們既將上述鋼條觸動發音之後。立卽將該條之木柄，放在一根木質手棍之一端，而另將耳朵置於手棍他端以聽之。又或用一極長之棍，其一端放在一架鋼琴『響板』Resonanzboden 之上。其他一端則引入一間相隔甚遠之室內。其結果該項鋼琴所發之音，憑借此棍之媒介，直能達於遠室之內。此又爲固體傳音之一證也。

（十一）　音波傳遞之速度

空氣傳遞音波。大約天氣溫度在寒暑表零度時。每秒鐘可行332　密達尺。（約合中國 1075.68 尺）假如天氣稍溫，則空氣較稀，因而音波傳遞較快。大約攝氏寒

暑表每升高一度時，則每秒鐘之內音波速度可增多 0.6 密達尺。(約合中國1.944尺)。反之若天氣稍寒，則空氣較密，因而音波傳遞較慢。大約攝氏寒暑表每降低一度時，則每秒鐘之內音波速度減少 0.6 密達尺。

空氣傳遞音波每秒鐘能行中國一百多丈，似乎跑得太快。其實我們若持與光線速度相較，則又渺乎其小。通常光線速度每秒鐘能行300000000密達尺之譜。(約合中國972000000尺)較之音波速度幾乎快一百萬倍。因此之故，假如我們立在1000密達尺之遠，看人放槍，則槍機一發，我們立刻看見火光。而槍聲則須三秒鐘後始入我們耳鼓。此外如遠望火車頭放氣。我們亦是先見其形，後聞其聲。天陰暴雨，亦是先見電而後聞雷。凡此皆係音波速度不及光綫速度之證也。

至於音波速度之快慢，與音之高低或強弱沒有什麼關係。換言之。高音之速度，與低音之速度相等。強音之速度亦與弱音之速度相等。倘若他們的速度不相等，那麼。我們聽人奏樂。其勢必至高低強弱之音，到耳先後不同。簡直會弄得一榻糊塗。

但是音波速度雖與音之高低或强弱無關。而與傳音物質之『分子密度』Dichtigkeit 及『彈力作用』Elastizität，却很有關係。凡『密度』愈小者則速度愈大。凡『彈力』愈大者則速度愈大。但是我們若欲考查某項物質之速度如何。必須將『密度』及『彈力』同時計算而後可。不要單顧一方。

通常是固體快於液體。而液體復快於氣體。譬如鐵質傳遞音波，每秒鐘可達5000密達尺。鋼絲傳遞音波，每秒鐘可達4000密達尺。而液體如水則每秒鐘僅能行1400密達尺。至於氣體如空氣，則每秒鐘不過只行 332 密達尺，更是望塵莫及也。

假如我們要試驗鐵質與空氣傳音孰快。最好用一根長鐵棍。於其一端，用錘擊打一下。同時將耳放在棍之他端。則我們必可先後聽出聲音二次。先到者係由鐵棍傳至。後到者乃係由空氣所傳至者也。

(十二)　空氣傳音速度音波長度顫動數三者之關係

在『音學』之上。『空氣傳音速度』『音波長度』『顫動數』三者之間，常有一種極

簡單之關係。我們只須知道其中兩種之數目便可求得其他第三種。

設有銅鐘一。其『顫動數』假定每秒鐘之內爲 100 次。而且每顫動一次便形成『一個音波』則先後顫動 100 次，便當先後有音波 100 個，陸續送出。現在我們又知道音波在空氣中傳遞之速度係每秒鐘行332 密達尺。（在寒暑表零度時。）那麼當其銅鐘恰恰響了一秒鐘之時其『顫動數』正滿 100。其音波數目當然亦正滿 100。其行程則正滿 332 密達尺。因而每個音波之平均長度爲3.32密達尺。若列爲公式則如下。

（1）$\text{音波長度}=\dfrac{\text{空氣傳音速度}}{\text{顫動數}}$，按即 $3.32=\dfrac{332}{100}$

由這個公式更可變成下列兩個公式。

（2）空氣傳音速度＝音波長度×顫動數，按即 $332=3.32\times 100$

(3) 顫動數 $= \dfrac{\text{空氣傳音速度}}{\text{音波長度}}$，按即 $100 = \dfrac{332}{3.32}$

(十三) 音波之反射作用

我們在前面所討論之音波傳遞問題。係假定音波傳出之後，其行途所經皆係同樣物質。（譬如皆係濃薄相同之空氣。）或途中毫無其他物質從中阻碍。但是事實上却不常常如此。譬如空中之氣，並非處處濃薄相同。假設音波從薄空氣中傳入濃空氣中。或者途中有山崖屋壁，阻其行程。其結果一部分音波直接穿入該項物質，而其他一部分音波則往往因而折回。於是有所謂『音波之反射作用』Reflexion des schalles 者發生。

這種『音波反射作用』與『光線反射作用』相同。譬如光線從右方斜射鏡面，復由鏡面反射出來，向着左方射去，與原來從右方射來之光線成一角形。『音波反射作用』亦然。假如有甲乙兩人同立於牆之一側。甲之面孔從右方斜對牆上。乙之面

孔則由左方斜對牆上。而且兩人相距皆不甚近。現在甲在右方開始對牆而語。而乙在左方却能聽得清清楚楚。此無他因甲之音波由右斜射牆上，復由牆上向左反射到乙之耳中故也。

（十四） 回聲與餘響

以上所述，是音波斜射情形。現在假定音波之射去，係由正面筆直射去。那麼，倘若中途被阻，彼必依然遵着原路（即前此射去之路）退回。所以我們正面對牆而語，常能自聽其『回聲』Echo。

據經驗得來。我們通常談話，能於每秒鐘之內，可以清清楚楚一連說出十個『單音』Silben。換言之每個『單音』需時十分之一秒鐘。假如那個牆立的太近，能將音波立刻擋回，其所需時間尚不及十分之一秒鐘。那麼當其我們未將一個『單音』說完之際，而回聲已至。於是音聲與口中正出之音，勢將混成一起。

假如那個牆之距離有17密達尺遠。則音波從口發出以及遇牆折回依然傳入

發語者之耳鼓所需時間恰恰十分之一秒鐘。(係照適當空氣溫度而言)那麼。我們發完一個『單音』之後，始行聽見該音回聲，不致與口中正出之音，混在一起。但是假如我們此時一連先後吐出許多『單音』那麼第一個『單音』之回聲，常與第二個『單音』相混。彷彿是一種亂人聽聞之餘響Nachhall。

現在我們再把那個牆之距離，移在34密達尺遠。則我們此時一連可以說出兩個『單音』不受回聲之擾。

假如有多數牆壁遠近不同。則其所產『回聲』亦復遲早不一。在『音學』中稱之為多數回聲Mehrfaches Echo。譬如我們船經三峽，大吼一聲。則其音波勢將在左右兩崖，撞來撞去，發出許多『回聲』攪成一片。我們亦可以稱之為『多數音聲』

(十五)建築物與音波反射作用之關係

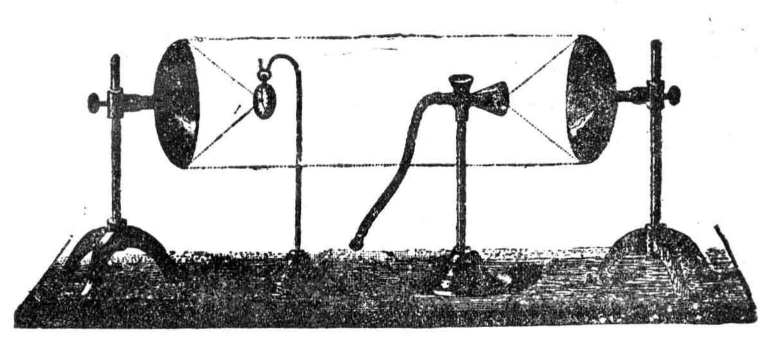
音之反射，回聲，餘響種種作用。不但在郊外露天之中如此。卽在大庭廣室之中亦然。假如有甲乙兩人同立於一間拋物線式 Parabel 屋頂之室中。彼此相距雖遠，

但仍可以對話。同時另有丙某亦立在該室中之其他一處，却對於甲乙兩人談話不甚聽得清楚。此無他。卽「音波反射作用」有以致此也。

我們知道。物理學上關於拋物線形與『音波反射作用』有一條定則。卽音波從一個『燒點』Brennpunkt(子)向『周線』Peripherie(丑)射去。復由『周線』(丑)反射到其他另一『周線』。(寅)然後再由『周線』(寅)歸結到另一個『燒點』(卯)上去。

譬如有拋物線形之凹鏡兩個。使之遙遙對立，如下列附圖十一。格外再用手錶一，懸在其中一個凹鏡之對面。是爲音波之『燒點』現在我們細看圖中音波由『燒點』(卽手錶)發出，成爲直線射往凹鏡「周線」之上。再反射到其他另一凹鏡之「周線」上。然後再歸結到另一個「燒點」上去。(按卽圖中所繪之『收音器』)

附圖第十一



因此之故。凡立在該拋物線形之『燒點』上者。因受『音波反射作用』之賜。所以聽得清清楚楚。如上述甲乙兩人是也。反之。立在『燒點』以外者。雖與他人同立一室之中，仍然聽不清楚。如上述之丙某是也。

假如建築形狀非係拋物線式。則其『音波反射作用』更爲複雜特別。往往亂人聽聞。因此凡係戲院，音樂場，演說大廳，皆以拋物線形爲最佳。無論屋頂，戲台後面上方，戲台對面上方，均宜採用拋物線形。以收『音波反射』之效。此外戲台對面或戲廳兩側之牆壁，常能引起種種不正當之囘聲或反射作用。我們若要避免這種不良影響。則宜於壁上

懸以布帛之類，使音波到此受其阻碍。減去囘聲或反射作用。至於戲場地板，當然亦可引起種種不正當之反射作用。不過因爲聽衆滿座之故。已將其反射作用，根本減少。

（十六）音波反射之特別研究

上面各節關于音波反射之普通原理。略已次第說明。但『音波反射作用』與樂器發音原理，尙有特別重要關係。故此處更設專節，幷分爲四項解釋如下。

（甲）假如我們有一根長而且細的鉄絲。將其兩端扣在左右對立之兩根鉄柱上。使之緊緊伸張。現在我們在左端鉄絲下面，用錘向上一擊。則鉄絲左端立刻成一凸形。而且繼續向右演進。造成許多凸形。（請參看前面第九節曲線音波之動狀。）但是假如此項凸形音波進行已至右端之時。無法再向前進。又當作何現象。那麼只好立刻發生『反射作用』。因爲鉄絲右端最終一個『分子』。（我們假定全絲分子如珠一串。）是緊緊扣在鉄柱之上，不能自由活動。當其他的左側那一個『分子

』意欲將他向上拖扯同造凸形之時。但是他早已扣緊，實在無法活動，只好謹謝不敏。于是他的左側那一個『分子』被他這一阻的結果。彷彿受一打擊。不得不向後方下面一退。因而反構成一個凹形。而且這種凹形繼續向左演進。造成許多凹形。一直動到左端。現在左端最終一個『分子，』亦因緊緊扣住不能活動之故。所以他的右側鄰近那一個『分子』意欲將他向下拖扯，同造凹形。而他却屹然不動。以致右側隣近那一個『分子』受此一阻。不得不向後方上面一聳。這樣一來。又製成一個凸形。繼續向右演進。總而言之。凡是兩端扣緊的鐵絲上所成之曲線音波動狀。如遇反射之時。則其原來凸形，至是一變而爲凹形。或原來凹形，至是一變而爲凸形。反射回去。而且『分子』動向，恰恰向上或向下打一個顚倒。

（乙）假如我們再把上述那根鐵絲取下。將其一端緊緊懸在室內天花板之下。其他一端則下墜空中，成一垂直之狀。現在我們在鐵絲上端左邊，將錘向右一擊。則鐵絲上端右邊立刻成一凸形。而且繼續向下演進，造成許多凸形。當其絲中各個

『分子』顫動之時。因爲上一個「分子」要將他的下一個「分子」拖動，以便共成凸形前進之故。所以不得不用幾分氣力。但是到了下端最終一個「分子」照例去拖之時。而其下面已無其他『分子』存在，所以他拖了一個空。不免向上一聳。因而最終一個『分子』離開他的原來『靜點』。特較絲中其他各（分子）爲甚。同時又因爲向上一聳的原故。又好像鉄絲下端從左受一打擊。因而鉄絲右邊成一凸形。繼續向上反射回去。總而言之。凡是上端緊扣而下端未扣的鐵絲上所成之曲線音波動狀。如遇下端反射之時。則其原來凸形，依然成爲凸形向上反射回去。而且『分子』動向始終向右未變。（假如當初錘擊之時。係在上端右邊，向左一擊。則凸形當然係向左邊隆起。及其下端反射之時。又好像鉄絲下端，從右受一打擊。因而鉄絲左邊成一凸形。繼續向上反射回去。其理全同，不必贅述。）

（丙）假如我們有一根長筒子。其一端之口封住。而他端之口則不封。以便空氣自由出入。現在我們假定口外空氣，忽然濃密起來。那麼口外空氣當然向着空氣

稀薄的筒中鑽進。因而筒中空氣亦復一層一層的濃密起來，向內進行。一直密到那頭木牆（按卽筒內盡處。）之時。其勢無法再向前進。于是此處空氣忽然堵住，特較筒中其他各層空氣爲密。這樣一來。又好像這個木牆曾將空氣撞了一下。因此牆邊空氣又復一層一層的濃密起來，向着口外反射出去。換言之。從前是空氣一層一層的濃密起來，陸續向着筒內木牆前進。現在則是空氣一層一層的濃密起來，陸續向着口外反射出去。

反之。我們假定當初筒子口外空氣忽然稀薄起來。那麼。口外空氣當然次第的把筒中較濃的空氣，一層一層的向外抽出來。于是筒中空氣亦復一層一層的稀薄起來。一直薄到木牆鄰近最後一層。已無其他空氣可以再抽。因爲此時牆邊空氣，只有抽去的，莫有補缺的。所以牆邊空氣特較筒中其他各層空氣爲薄。又好像牆邊起了一種吸之作用。將其隣近濃密空氣，一層一層的吸薄。一直薄到口外。換言之。從前是筒中空氣爲口外所抽。因而一層一層的稀薄起來。一直薄到木牆。而『分子』動向

則係向着筒口出去。現在則是筒中空氣爲牆邊所吸，因而一層一層的稀薄起來。一直薄到口外。而『分子』動向則係向着木牆進來。

總而言之。凡是一端封口而他端開口的筒子所成之直線音波動狀。如遇木牆方面反射之時。則其原來『濃密作用』向口內進行者，依然成爲『濃密作用』向口外反射。或原來『稀薄作用』向口內進行者。依然成爲『稀薄作用』向口外反射。而『分子』動向則恰恰向內或向外打一個顚倒。

（丁）上面所述係指空氣濃或薄之作用，由口外到木牆，再由木牆發生反射作用。現在所論則爲空氣之或薄濃作用由木牆到口外，再由口外發生反射作用。我們假定筒中空氣一層一層的濃密起來，向着口外擠出而口外空氣因四周空闊，行動自由之故。本較筒中空氣爲稀。于是筒中空氣努力向外擠出之後。忽然活動餘地較多。因而發生一種抽的作用將筒中空氣一層一層的稀薄起來。一直向着木牆那頭反射回去。而（分子）動向則始終皆向着口外未變。

反之。假如筒面木牆方向發生吸的作用。將筒內空氣一層一層的稀薄起來。一直薄到口外最後一層。又當如何反射。我們知道當其筒中每次內一層空氣欲將外一層空氣吸薄時。非用幾分力量不可。（因爲外一層空氣同時又受着其他外一層空氣粘力之故）但是現在到了口邊最後一層之時。因爲口外空氣較薄，粘力不强之故。於是口邊最後一層空氣，受着內一層空氣之吸拖，毫無抵抗能力。聽其吸拖，撞上前去。這樣一來。筒口空氣又起了一種『濃密作用』。一直向着木牆方面反射囘去。而『分子』動向則始終皆向着木牆方面未變。

總而言之。凡是一端封口而他端開口的筒子所成之直線音波動狀。如遇筒口方面反射之時。則其原來『濃密作用』向着口外進行者，至是則變爲『稀薄作用，』向着口內木牆反射囘去。而『分子』動向則始終向着口外。或原來『稀薄作用』向着口外進行者，至是則變爲『濃密作用，』向着口內木牆反射囘去。而『分子』動向則始終向着口內。

我們知道。大凡筒中空氣起了『濃密作用』奔向口外之時。照普通音波傳播原理。口外空氣當然隨之引起『濃密作用』，向着空際四周而去。無待贅言。但該音波自身向着筒內反射回去，却係『稀薄作用』。此則不可不知。反之。當其筒中空氣起了『稀薄作用』薄到口外之時。口外空氣亦當然隨之引起『稀薄作用』，向着空際四周而去。亦無待贅言。但該音波自身向着筒內反射回去，却係『濃密作用』。此亦不可不知。

上面(甲)(乙)(丙)(丁)四項所述。皆係假定鉄絲一端(或兩端。)扣緊，或是筒子一端塞住。遂不能傳遞音波。其實事實上却不盡然。譬如鉄絲一端扣在鉄柱之上。而音波何嘗不可隨着該端引到鉄柱之上。又如筒子一端用木頭塞緊。而音波又何嘗不可穿過木牆而去。我們之所以故意設立上述各種不甚合理之假定者。(按卽扣緊或塞住便不能傳遞音波之假定。)以其易於說明『反射作用』故也。讀者幸勿因此誤會。是爲至要。

（十七）音波之交叉

什麼叫做『音波之交叉』Interferenz？我們爲容易明瞭起見。且先舉一譬喻。假如我們同時分投兩石於池中兩處。其結果兩處水面各成圓形波紋凸凹起伏，續向四周擴去。最後兩個波紋忽然相遇。於是兩波遂成交叉之狀。而且有三個定例。（甲）假如兩波相遇之時。正值彼此皆係凸形之際。則共成一個更高凸形。其高度恰等於該兩凸形高度相加之和。（乙）假如兩波相遇之時。正值彼此皆係凹形之際。則共成一個更深凹形。其深度恰等于該兩凹形深度相加之和。（丙）假如兩波相遇之時。正值一爲凸形，一爲凹形之際。則共成一個凸形，或凹形。其高度或深度恰爲原來凸形的高度及凹形的深度相減之差。

但是兩波相遇，雖然造出種種高低形象。而其各自向前進行之狀態，則却不因而停滯。彷彿該兩波在途中並未嘗發生任何阻碍一樣。我們但見其原來兩個圓形波紋，大體上仍是續向四周擴去而已。

音波之交叉情形亦正復如此。譬如『曲線音波』之交叉，則爲（甲）兩個凸形相遇，則共成一個更高凸形。（乙）兩個凹形相遇，則共成一個更深凹形。（丙）一個凸形與一個凹形相遇，則共成一個凸形或凹形。（其高度或深度爲原來凸形高度與原來凹形深度之差。）

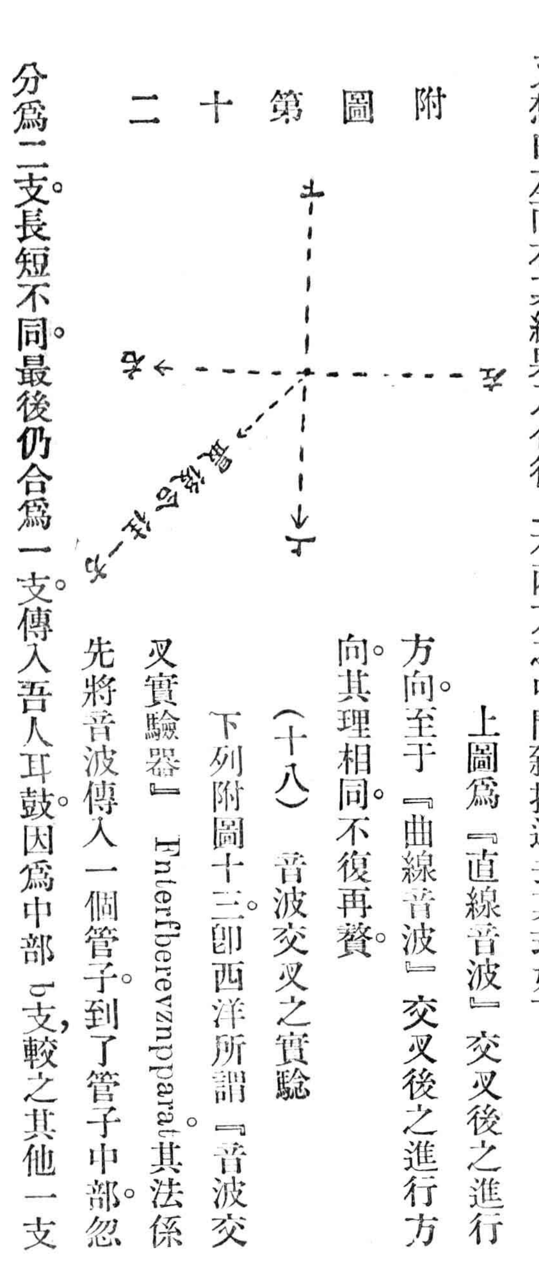
至于『直線音波』之交叉，則爲；（甲）如係『濃密』與『濃密』相遇，則造成一種『更濃密』。（乙）如係『稀薄』與『稀薄』相遇，則造成一種『更稀薄』。（丙）如係『濃密』與『稀薄』相遇，則彼此互相調和。

上面所述之相加或相減算法。在『音學』上稱之爲『架疊法』Superposition。這種音波交叉架疊的情形。在宇宙之中，幾乎無時無地不有。譬如在跳舞場中，樂器的吹奏聲，男女的步履聲，棹面的酒盃聲，座上的談笑聲，無不同時共發，各成音波，分向四圍擴去。途中彼此相遇，你叉過去，我叉過來。最後撞到場中壁上，又復反射回來。一直等到『音力』既竭，然後歸于消滅。其情形之錯綜複雜，眞是不可思議。卽在空

野之中亦復各種聲音同時並發，彼此交叉。何常有一次是單獨純粹的唯一音波。

此外關于音波交叉後之進行方向，尚須加以一點說明。假如有兩個音波。一個是由下而上，其他一個是由左而右。當其兩個音波相交之時。一個想由下而上，一個又想由左而右。其結果乃合往上右兩方之中間斜插過去。其式如下。

附圖第十二



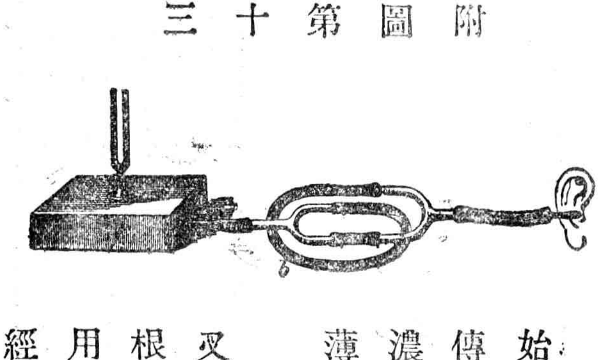
上圖爲『直線音波』交叉後之進行方向。至于『曲線音波』交叉後之進行方向。其理相同。不復再贅。

（十八）　音波交叉之實驗

下列附圖十三。即西洋所謂『音波交叉實驗器』Fnterfberevznpparat。其法係先將音波傳入一個管子。到了管子中部忽分爲二支。長短不同。最後仍合爲一支。傳入吾人耳鼓。因爲中部b支，較之其他一支

恰長『半個音波』之故。所以兩支合併之時。正值一爲『濃密』，一爲『稀薄』之際。其結果依照上述音波交叉原理成爲『濃稀調和』。

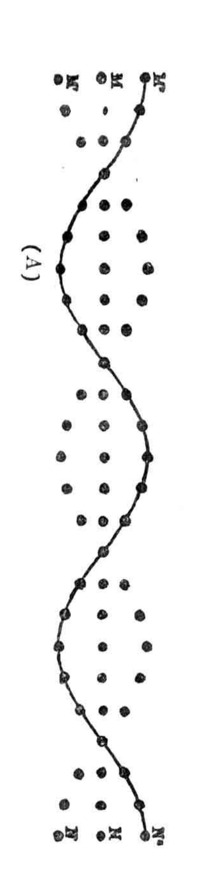
附圖第十三



反之。我們假如另造一種器械。使傳遞音波之管子，自始卽分爲兩支。而且彼此長度恰恰相等。最後仍合爲一支。傳入吾人耳鼓。則其結果兩支音波合流。或係彼此皆値『濃密』之際。於是共成一種『更濃密』。或係彼此皆値『稀薄』之際。於是共成一種『更稀薄』。

以上係指『直綫音波』而言。至於『曲線音波』之交叉情形。我們亦可以用圖表示。下列附圖十四。從M到N那根虛綫是鐵絲未動時之狀態。假若我們在該線左端下面，用錘向上一擊。則M點必將上下往來顫動不已。於是鐵線經過相當期間，將變成一種曲線音波動狀，如M到N那根

黑線。反之。假若我們原來係在該絲在左端上面向下一擊。則鐵絲又將變成曲線動狀，如M到N那根虛綫。現在我們假定MN與MN兩根曲綫係同時產成。而凸凹兩形恰恰彼此反面對立其交叉之點，則恰恰落在原來MN那根靜態直線之上。其結果所有交叉之點，皆無音可生。



附圖第十三

假如我們將MN那根虛綫向右移往『半個音波』時。則M一點恰與MN那根黑線上之(A)點相合。於是MN曲綫上之凸凹兩形，與MN曲綫上之凸凹兩形，彼此相遇。照上述交叉原理。則兩凸形或兩凹形相遇，或共成一個更高凸形。或共成一個更深凹形。

（十九）曲線音波之構成

前面第（九）節內關于『曲線音波』之動狀，業已略爲解說。但是此種『曲線』之眞相如何，有何方法可以使此眞相實地繪出，以資我們研究。據通常所用之法，計有兩種。（一爲『繩錘擺動』，一爲『定音叉顫動』）能將曲線眞相實地繪出。茲請分述如下。

（甲）由繩錘擺動所求得之曲線動狀。　假如我們用繩一根。其上端懸于室內天花板之下。其下端則墜以鉛錘。鉛錘之下面復嵌一削尖鉛筆。鉛筆尖端之下，有棹子一個。棹上舖紙一張。紙面恰與鉛筆尖端相觸。此項相觸之點。我們暫且稱呼爲D點。假如我們現在逐漸將紙向左方移動。而同時鉛錘仍使之安然不動。則鉛筆尖端必在紙面繪一水平直線。（參看附圖十五。）繪出之後。我們再將該紙退回原處。使筆尖仍與原來D點相觸。然後用力再將鉛錘向D點上方推去。于是鉛錘筆尖復在紙面繪一垂直線。恰與前此水平直線成一直角形。（參看附圖十六。）但是假如我們

一面將鉛錘向D點上方擺去。而同時一面又將該紙逐漸向左方移動。那麼。現在鉛錘筆尖。既不能向D點上方畫一垂直線。亦不能向D 點右方畫一水平直線。乃是在D點右上兩方之中。畫一曲線。（參看附圖十七。）

附圖第十五　附圖第十六　附圖第十七

鉛錘既達到『極點』A之時。復回身往下方擺去。因爲那張紙面仍是不斷的往左移動之故。所以鉛錘筆尖，復由A向右斜下，畫一曲線。（參看附圖十八。）其形狀及速度皆與DA 相同。

待到鉛錘穿過F點（按F點與D點同在一根水平線上）。時。復在下方畫一FGE曲線。其理與（DAF全同。不過方向打一個顛倒而已。（參看附圖十九。）

附圖第十八

附圖第十九

好了。現在我們曲線音波的眞相已求得了。但是我們還須再進一步，研究這根曲線有些什麼性質。

我們現在先將D E兩點連成一根水平線。稱爲『橫距』Abscisse。然後再將這根水平線分爲十二個距離相等之部分。復於每部分之界點上，各立一根『縱線』，Ordinate以與曲線相接。（請參看下列附圖二十中右方之自D至E一段。）我們從此可以看出該項曲線共分四段。一爲從D到3。二爲從3到6。三爲從6到9。四爲從9到12。而且圖中的『縱綫3』與『縱綫9』卽是繩錘擺動時之『動程』長度。

現在我們再將這個『動程』長度，作爲『半徑』Radius。畫一圓周。（請參看下列附圖二十中左方那個圓周。）然後又將圓周分爲十二個距離相等的部分。並將各部分之界點，如1,2,A,4,5,11,10,B,8,7, 等各引成一根『縱綫』與圓周直徑C D橫綫相接。此種『縱綫』在數學上稱之爲『正弦』Sinus。

附圖二十

好了。現在我們又發現了。圓周中之正絃1』恰與右方曲綫圖上之『縱綫1』相等。『正絃2』則等於右方曲綫圖上『縱線2』。『半徑AM』則等於右方曲線圖上『縱線3』。『其餘一切『正絃』，亦無不與右方曲線圖上一切『縱線』各自相等。因此之故。我們只須知道『動程』長度。便可求得『圓周』。有了『圓周』。便可求得『正絃』。有了『正絃』便可求得『曲線眞相』。所以繩錘擺動之法。事實上用不着一一實地試驗。只須知道他的『動程』長度就夠了。

例如我們已經知道某種繩錘擺動之『動程』長度爲若干。便以此種長度作爲『半徑，』(如上列圖中之A M) 繪一『圓周。』然後再將『圓周』分爲十二個相等部分。引設各種『正弦』與『直徑』橫線C D 相接。(如上列圖中之1,2,正弦等等。)

『正弦』既已求得。於是我們又在旁邊另繪一根水平線D E。(按即『橫距。』) 並且將他分爲十二個相等部分。(如上列圖中之 $\frac{1}{12}$ $\frac{2}{12}$ $\frac{3}{12}$ 各點是也。) 然後再將圖中各種『正弦，』(按A M『半徑』亦包含在內。) 一一依次移植在那根D E水平線間各部分之界點上。而且1,2,3, (按即圓中A線。) 4,5 諸線垂直立在水平線上。7,8,9, (按即圓中B線。) 10,11, 諸線。垂直立在水平線下。現在我們但將各根縱線之尖端連絡起來。並使其與D, 6,E, 三點連成一氣。則這根『曲線』便躍然湧現於我們之前。這根『曲線，』便是上述某種繩錘擺動之『曲線』動

狀。

至於那根DE水平線之長度，則可長可短，初無一定。譬如我們假定當初將紙向左移動時。移的愈快，則所成之曲線愈長。所需之DE水平線亦愈長。反之。移的愈慢，則所成之曲線愈短。所需之DE 水平線亦愈短。此外凡水平線愈長者，則其曲線之形態亦愈顯著。但是水平線長者則同時縱線亦應加多。換言之。卽將水平線多分成若干相等部分。（不必限於十二個。）同時圓周分割部分之數亦然。以便『曲線』形態能充分顯出。

照此看來。圓周中之『正絃，』既與繩錘擺動之『曲線動狀』有如此密切關係。因而我們亦常將『繩錘擺動之曲線』Pendelkurve，稱爲『正絃』曲綫Sinukurve。

（乙）由定音叉顫動所求得之曲綫動狀。 下面附圖二十一，係用一『定音叉Stimmgabel實驗曲綫動狀。叉頭嵌一鉛筆尖b。筆尖之下置一白紙B。B現在我

們若將筆尖與白紙上之d點相觸，而同時復將白紙繼續向右移動。若此時該叉未顫動，則筆尖在紙上畫一dc水平直綫。反之。若此時該叉正在顫動，則筆尖在紙上畫一dc曲綫。

附圖二十一

（二十）曲線複音波之構成

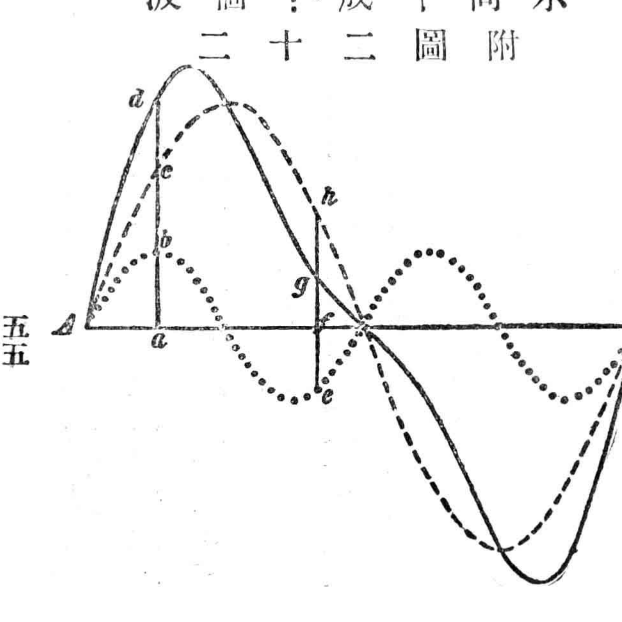
以上所述之『曲線音波』皆係指單音波 Einfache Tonwelle 而言。換一句說。即是由一種單音波所構成之『曲線音波。』現在我們假定有兩種單音波（或兩種以上）同時同地出發。而他們倆的高低（按即『顫動數』多寡不同。）與強弱，

（按即「動程」大小不同。）卻彼此不同。究竟他們倆能夠合作一種什麼音波出來？其求法如何？

由兩種高低强弱不同之單音波所混合作成之音波。是爲複音波 Klangwelle。其求法如下。

下列附圖二十二中。A B─線是表示『分子』未動時之靜態。如我們在A點同時出發甲乙兩種音波。甲音波之線爲────。在某種期間之內。恰恰自A 到B，作成一個凸形與一個凹形。乙音波之線爲……。在同樣期間之內。卻能從A到B，作成兩個凸形與兩個凹形。換言之。甲音波與乙音波之比較。其『顫動數』恰爲1:2。

附圖二十二



現在我們從A B線上之a點，向上引出一根『縱線』與甲曲線上之c點相接。是爲ac『縱線』。再從 A B 線上之 f 點，向上引出一根『縱線』。與甲曲線上之h點相接。是爲 f h『縱線』。然後又從a 點向上方乙曲線之b點，引出一根 a b『縱線』。此外再從 f 點向下方乙曲線之 e點，引出一根fe『縱線』。

我們在前面第（十七）節內曾經說過。音波交叉之法，共有三種。（一）凡凸形與凸形相遇則相加。（二）凡凹形與凹形相遇則相加。（三）凡凸形與凹形相遇則相減。好了。現在甲凸形 ac 既與乙凸形 a b相遇。則應該將a b 一節加在a c 一節之上去。結果成爲a d 一根『縱線』。（按圖中 cd＝a b）。反之甲凸形fh與乙凹形fe相遇。則應該將fe一節從fh之內減去結果成爲fg一根『縱線』。（按圖中hg＝fe）。

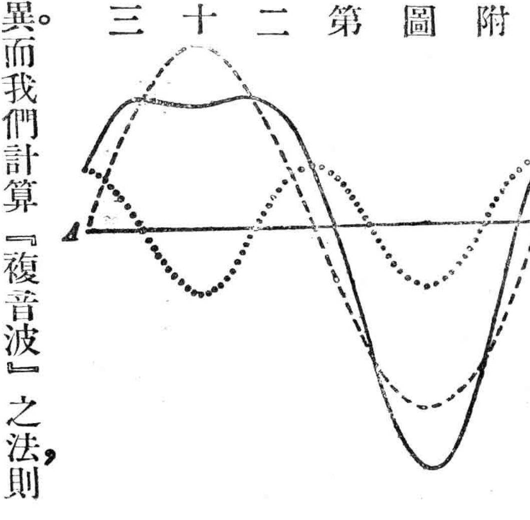
假如我們將A B 線上所有各點，皆一一依照這種辦法引出許多『縱線』出來。然後再將各根縱線之尖端連絡起來。便是圖中所繪之第三種曲線。（按即圖中

之曲形黑線）是卽甲音波與乙音波所混合作成之『複音波』

『上面所述之『複音波』係由兩種『單音波』同時同地發出之後所合作而成者。現在我們再假定上述兩種『單音波』其發出也並非恰恰同時同地則其所合作之『複音波』又當何如？

下列附圖二十三中之甲音波仍在A點動身。而乙音波出發之點則在A點之上。好像是乙音波早在A點左旁動身，現在恰恰走到『極點』之際。（卽乙音波最高之點。）而甲音波始於其時在A點動身。故甲乙兩音波出發之時與地，實彼此不相同也。

附圖第二十三



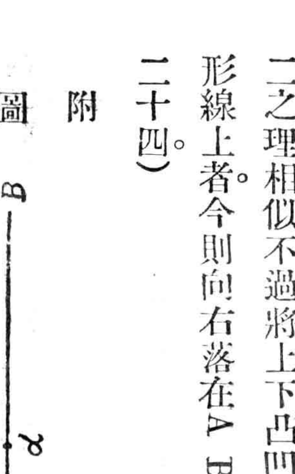
但是甲乙兩音波出發之時與地，雖各有差異。而我們計算『複音波』之法，則

仍與前面附圖二十二之例相同。換言之。卽(1)兩凸形相遇則加。(2)兩凹形相遇則加。(3)凸形與凹形相遇則減是也。不過由本例所求得之『複音波』其形態頗與前例附圖二十二所求得者相異。讀者試將附圖二十二與附圖二十三中之曲形黑線，一爲比較便知。

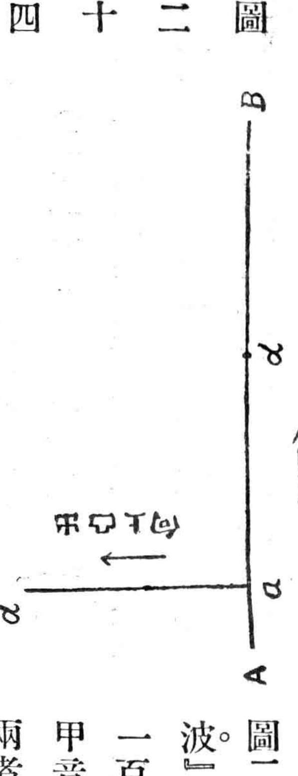
假如『單音波』之數不止兩種。則我們宜先將其中兩種，用上述方法共造成『複音波』丙。然後再將第三種『單音波』與『複音波』丙，亦用上述方法共造成『複音波』丁。然後再將第四種『單音波』與『複音波』丁，共造成『複音波』戊。如此類推下去。最後求得之『複音波』。卽爲各種『單音波』所合作而成者。

以上所述皆屬於『曲線複音波』一類。此外關於尋求『直線複音波』之法。其理亦正相同。我們知道。『曲線音波』與『直線音波』之分別。不過是前者向上動時，則後者係向右擠。反之。前者向下動時，則後者係向左擠而已。那麼假如有甲乙兩個『直線音波』同時同地發出。則其所合作之『複音波』亦正與上列附圖二十

二之理相似。不過將上下凸凹之形改爲右左擁擠之狀而已。（譬如原來d點在凸形線上者。今則向右落在A B水平線上。a d距離長度始終如一。請參看下列附圖二十四。）



附圖二十四



又上列附圖二十二及附圖二十三。皆只有一個『複音波』。假如我們把A B線延長一百倍。則其間當有一百個『甲音波』。二百個『乙音波』。兩者共造成一百個『複音波』。由此觀之。『複音波』之數。恰恰等於『甲音波』之數。換言之。卽等於『低音波』之數。因前面所舉之例。係假定『甲音』低於『乙音』故也。（按『甲音』比『乙音』低一個『音級』〔Oktave〕）

現在我們再進一步追。問究竟我們研究此種『複音波』之構成有何實益？其答案便是：假如有兩種（或兩種以上）『單音波』於此。我們可以設法求出他們合作的『複音波』。反之假如有一種『複音波』於此。我們亦可以將他設法分析出來，究係由那幾種『單音波』所合作而成者？

（二十一）　曲綫立音波之動狀

從前各節所講『曲線音波』之動狀。皆係凸凹起伏蜿蜒之狀。（請參看前面附圖十）現在所述之『曲線立音波』stehende Transverralwelle。則因種種關係之故。其動狀無復蜿蜒之態。但見其從上至下無數細絲排立而已。茲繪一圖如下。以資比較。

附圖二十五

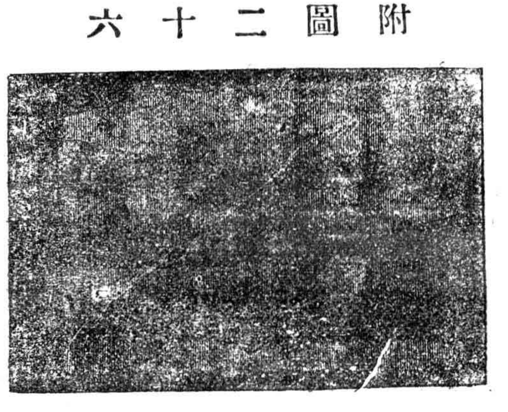
在『音學』之上，此種『立音波』甚關重要。因爲我們各種樂器發音的原理，與此極有關係故也。按『曲線立音波』成立情形有二。茲請分爲甲乙兩項，敍述如下。

（甲）假如我們有一根鐵絲A B。將其兩端扣住。而且A B長度恰等于某音的『半個音波』之長。換言之。卽是假如我們在A端之下，用錘向上一擊。則『顫動半次』之後，恰恰達到B端，造成一個凸形。是爲『半個音波』。（按一個凸形與一個凹形，總共稱爲『一個音波』。若以『顫動數』言之。則每『顫動半次』產出『半個音波』每『顫動一次』產出『一個音波』）現在B端依照前面第十六節甲項所講原理，開始發生反射作用。轉身向下射去，成一凹形。而同時A端因爲完成其餘半次顫動之故，亦正向下方製造凹形。其結果下方同時共成兩個凹形。

倘鐵絲A端此時復向上方再行繼續『顫動半次』則其結果又在上方成一凸形。但是同時前此下方兩個凹形亦正因發生『反射作用』之故，一自A端，一自B端，轉身向上射去，成爲兩個凸形。於是現在上方共有三個凸形。

總之。這根鐵絲的動狀或是向上方造成凸形。或是向下方造成凹形。隨時往來更換。因而A B之間形成一種『麵棒』之狀。換言之。卽兩頭尖而中間粗是也。（請參看下列附圖二十六中之第一圖）在『音學』上稱呼這根『麵棒』的兩頭尖端爲『結點』Knotenpunkte。棒中粗闊之部爲『動腹』Schwingungsbauch。

附圖二十六



因爲所有絲中各個『分子』同時一齊轉身向上或向下穿過A B水平線之故。所以我們一眼望去好像無數『垂直線』比肩而立一樣。與從前幾節所講普通曲線音波之蜿蜒動狀，迥乎不同。因此我們稱之爲『立音波』。

上面所述之『立音波』，係就A B之長恰恰等於『半個音波』。而言現在我們再假定A B之長，恰恰等於『一個音波』。換言之。卽是當初A端被

擊。經過『顫動一次』之後，恰恰達到B端。其結果A B之間，造成一個凹形與一個凸形。其式如下。

附圖二十七

A M B

顫動既到B端之後，又開始發生反射作用。最初當然先由B端向下製造凹形。但是後來反射作用既達A端之際，則變成下列形式。

附圖二十八

A M B

復次。當其B端初起反射作用之際。又正值A端開始第二次顫動之時。及B端反射作用達到A端之際（如上列附圖二十八）又正值A端第二次顫動恰到B端之時。（按A端第二次顫動之結果亦成一凹一凸之形。恰如上列附圖二十七。）於是A M之間共有兩個凹形。M B之間共有兩個凸形

假如顫動繼續下去則A M與M B之間，時而凸形，時而凹形，成爲兩個『動腹』上下往來顫動而以A M B三個『結點』界之，各自完成一種『立音波』之作用。如上列附圖二十六中之第二圖是也。

倘當初A B長度係等於三個或四個『半個音波』則其結果又將造成三個，或四個『動腹』一如上列附圖二十六中之第三或第四等圖。

總而言之上述『立音波』之所以成立必須A B長度，等於該音的『半個音波』之長，或一連幾個『半個音波』之長，方可。因爲由此所發生之『反射作用』實爲造成該項『立音波』之重要原因故也。又上面所謂『半個音波』，事實上卽是『顫動半次』故我們亦可以說A B長度須與『顫動次數』有一定關係。

(乙)假如我們有一根鐵絲A B其長恰恰等於『四分之一音波』現在先將B端緊緊扣住，而A端則不扣住。然後在A端之下，用錘向上一擊。經過『顫動四分之一次』以後。A端高高拱起，與B端共成一個『半凸形』其式如下。

未動以前之狀態

A (不扣) ——— B (扣住)

『顫動四分之一次』以後之狀態

(1)

A ——— B

到了『顫動四分之二次』（按即半次之意）以後。A端復歸原位。而同時第(1)次所成之『半凸形』，又正從B端開始反射，造成一個『半凹形（1。）參看前面第十六節之甲項）因而上方與下方之兩種動作，彼此恰恰相消。A B之間依然成爲一根水平線。

到了『顫動半次』以後之狀態

(2)

A ——— B

(1)

A ——— B

到了『顫動四分之三次』以後。A端復向下方造成一個『半凹形』(3)。而同時第(I)次之顫動又復開始反射，成爲一個『半凹形』(II)。(參看前面第十六節之乙項)

附圖三十一

到了『顫動四分之三次』以後之狀態

A　B
(3)
A　B
(II)

到了『顫動四分之四次』(按即一次之意)。以後。A端復歸原位。而同時第(3)次所成之半凹形，又正從B端開始反射，造一個『半凸形』(III)。因而上方與下方之兩種動作，彼此恰恰相消。AB之間依然成爲一根水平線。

附圖三十二

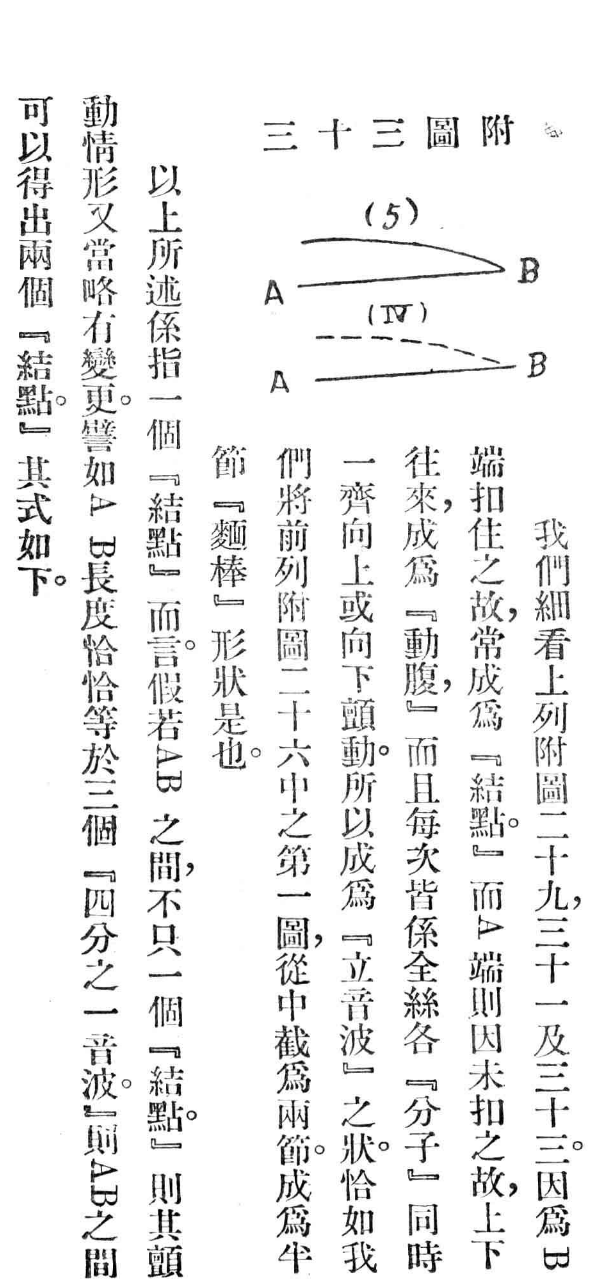
A　B
(4)　(III)

到了『顫動一次』以後之狀態

B　A

假如現在顫動繼續下去。則AB上方又將造成一個『半凸形』(5)。而同時第(III)次之顫動，又復開始反射，造成一個『半凸形』(IV)。

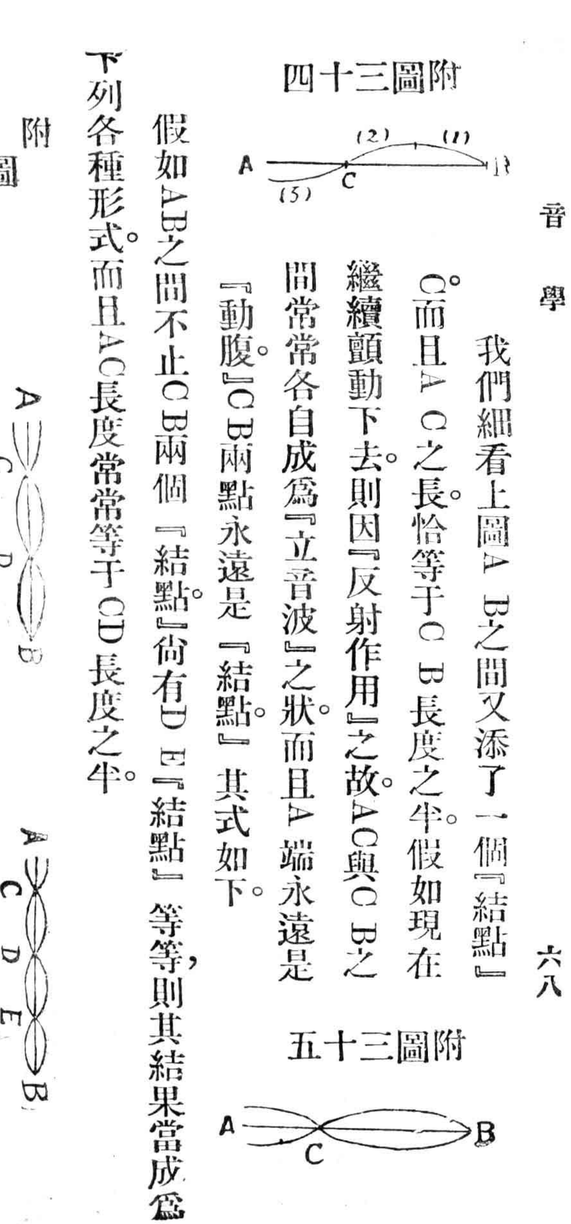
我們細看上列附圖二十九，三十一及三十三。因爲B端扣住之故，常成爲『結點』。而A端則因未扣之故，上下往來，成爲『動腹』。而且每次皆係全絲各『分子』同時一齊向上或向下顫動。所以成爲『立音波』之狀，恰如我們將前列附圖二十六中之第一圖，從中截爲兩節。成爲半節『麵棒』形狀是也。



附圖三十三

以上所述，係指一個『結點』。而言假若AB之間，不只一個『結點』。則其顫動情形又當略有變更。譬如A B長度恰恰等於三個『四分之一音波』。則AB之間可以得出兩個『結點』。其式如下。

附圖三十四



我們細看上圖A B之間又添了一個『結點』。而且A C之長恰等于C B長度之半。假如現在繼續顫動下去。則因『反射作用』之故。AC與C B之間常常各自成爲『立音波』之狀。而且A端永遠是『動腹』。C B兩點永遠是『結點』。其式如下。

附圖三十五

假如AB之間不止C B兩個『結點』。尚有D E『結點』等等，則其結果當成爲下列各種形式。而且AC長度常常等于CD長度之半。

附圖三十六

由此觀之。本節所述甲例（鐵絲兩端扣住）與乙例（鐵絲只扣一端）不同之

點。即前者A B間之部分數目。其數常爲『整數。』如1,2,3,4,之類是也。後者則A C長度常等於C B長度(或CD長度)之半。故其結果A B間之部分數目，常爲『非整數。』如$\frac{1}{2}$(按即半節『麵棒』之式)$1\frac{1}{2}$, $2\frac{1}{2}$, $3\frac{1}{2}$, 等等是也。又前者A B之長，常等於『半個音波』(或爲一連幾個『半個音波。』)後者A B之長，常等於『四分之一音波。』(或爲一連幾個『四分之一音波』)

(二十二)直線立音波之動狀

我們在前面第(九)節內，曾經講過『直線音波』與『曲線音波』之分別。在乎『分子』活動方向不同。換言之。凡『曲線音波』中之向上行者，在『直線音波』中則爲向右擠。反之。凡『曲線音波』中之向下行者，在『直線音波』中則爲向左擠。除此一點相異以外。其餘所有『曲線音波』與『直線音波』之理，彼此無不相同。因此之故。前節所述『曲線立音波』之理。亦可直接移到『直線立音波』上面。

現在我們再將『曲線立音波』與『直線立音波』詳繪一圖比較如下。

附圖三十七

圖中最下一行A B爲未動以前之狀態中間一行爲『直線立音波』之動狀。最上一行爲『曲線立音波』之動狀。

圖中 A C D E B諸『結點』皆始終屹然不動因此之故A C之間若在最上一行則時而凸形時而凹形全部上下往來以成爲『立音波』之狀若在中間一行則時而右擠時而左擠全部右左往來以成爲『立音波』之狀。

其結果C點在最上一行則爲AC凸形與CD 凹形交界之處在中間一行則爲

AC與CD間最密之處反之D點在最上一行則爲CD凹形與DE凸形交界之處在中間一行則爲CD與DE間最稀之處。

誠然C,D,E,各「結點」並不是永遠皆爲最密或最稀之處乃是時而變成最密之處，時而又變成最稀之處不過在圖中頗不容易畫出罷了。我們設想在一條橫竿之上自左至右一連排掛A,C,D,E,B,五根繩墜彼此距離相等現在我們同時用手將C繩墜向左邊A繩墜擺去E繩墜向右邊B繩墜擺去於是CE兩根繩墜，時而共向中間D繩墜擺去時而又分向兩邊A,B,繩墜擺去這或者可以略爲形容那種時密時稀之現象。

以上係就「直線立音波」與「曲線立音波」彼此異同之點一爲討論現在請再進一步研究「直線立音波」係如何成立茲請分爲甲乙兩項敍述如下。

(甲)假如我們有一根筒子AB將B端之口封住而A端之口則不封並且筒子長度恰恰等于某音「四分之一音波」現在我們使A端空氣發生「濃密作用

』逐漸向着筒內B端而進。到了B端，恰恰完成『四分之一音波』。(請參看前面附圖九中之(B)行從a到e。)

繼而第二個『四分之一音波』又開始從A端向着筒內B端發生『稀薄作用』(請參看附圖九中之(C)行從a到e。)但同時前此第一個『四分之一音波』亦正從B端成爲『濃密作用』向着筒口A端反射出來。於是『稀薄作用』與『濃密作用』相遇。彼此調和。

現在第三個『四分之一音波』，又開始從A端向着筒內B端發生『稀薄作用。』(請參看附圖九中之(D)行從a到e。)但同時前此第一個『四分之一音波』，又正從A端成爲『稀薄作用』，向着筒內B端反射進來。前此第二個『四分之一音波』，亦正從B端成爲『稀薄作用』，向着筒口A端反射出來。於是三個『稀薄作用』相遇。成爲最稀薄。

最後第四個『四分之一音波』，又開始從A端向着筒內B端發生『濃密作

用』(請參看附圖九中之(E)行從a到e。)但同時前此第一個『四分之一音波,』又正從B端向着筒口A端,成爲『稀薄作用』反射出來。前此第二個『四分之一音波,』又正從A端向着筒內B端,成爲『濃密作用』反射進來。前此第三個『四分之一音波,』又正從B端向着筒口A端,成爲『稀薄作用』反射出來。於是共有兩個『濃密作用』與兩個『稀薄作用。』彼此雙雙相遇。恰恰調和平均。

總之。筒中空氣『分子』左右往來顫動。而B端則永遠不動,是爲『結點。』時而變成空氣最密之處,時而又變成空氣最稀之處。至於A端則係『動腹,』是爲『分子』顫動最烈之處。

假如筒中『結點』不止B端一個。尚有二三等等『結點』雜於其中。則其理由與上列附圖三十五及附圖三十六相同。不復再贅。

(乙)假如我們有一根筒子A B。兩端皆未封口。而且筒子長度恰恰等於某音的『半個音波。』現在我們使A端空氣發生『濃密作用,』向着筒中進行。其結果

達到B端之時。恰恰完成『半個音波。』其式如下。（按下列圖中黑線係表示濃密。虛線係表示稀薄。請參看前面附圖九中之(C)行由a到i。）

附圖三十八

按上面所謂『半個音波，』事實上卽是等於兩個『四分之一音波。』如圖中之(1)(2)兩段。現在假定第三個『四分之一音波』又從A端開始發生『稀薄作用，』向着筒中進行。而同時前此第一個『四分之一音波，』亦正從B端成爲『稀薄作用，』向着A端反射囘來。其結果兩個『稀薄作用』恰在筒子中間C點相遇。造成『稀薄中心，』是爲『結點。』其式如下。

附圖三十九

最後第四個『四分之一音波，』又從A端開始發生『濃密作用，』向着筒內進行。而同時前此第三個『四分之一音波，』亦正從C點成爲『稀薄作用，』向着A端反射囘來。以外還有前此

第二個『四分之一音波，』則正從B端成爲濃密作用』向着C點反射而來。前此第一個『四分之一音波，』則正從C點成爲『稀薄作用』向着B端反射而去。其結果成爲下列形式。

附圖四十

B　　　C　　　A

(2)　　(4)

(1)　　(3)

細看上圖，AC之間同時具有一密一稀作用，因而互相調和。CB之間亦同時具有一密一稀作用，亦復互相調和而C點則獨據中心，安然不動，是爲『結點。』

假如現在第五個『四分之一音波，』又開始從A端發生『濃密作用』向着筒內進行。同時前此第四個『四分之一音波，』亦正從C點成爲『濃密作用』向着A端反射。前此第三個『四分之一音波，』亦正從A端成爲『濃密作用』向着C點反射。此外還有第二個『四分之一音波，』則正從C點成爲『濃密作用』向着B端反射；第一個『四分之一音波，』則正從B端成爲『濃密作用』向着C點反射。其結

果C點成爲『濃密中心』,是爲『結點』其式如下。

總之,C點永遠是『結點』而AB兩端則各自成爲『動腹』自C到A與自C到B,各等於『四分之一音波。』

附圖四十一

A　C　B
(5)　(2)
(4)　(1)
(3)

假如筒中係有兩個『結點』D。E則其位置必是一在AC之中,一在CB之中。因爲必如此然後AD或EB始等於DE長度之半也。

附圖四十二

C
A　D　E　B

(二十三)同聲相應

假如我們有甲乙兩件同樣的樂器同時放在一張棹上。而且在每件之上各自擊着d a二絃。現在我們若將甲器上之d絃彈出聲音。則同時乙器上之d絃,雖無人

去彈，亦必自然隨之發音。又或甲乙兩件樂器之絃皆不彈動。我們但向着棹上發出一種歌音其音高度恰與甲乙器上ㄉ絃相等。則此時甲乙器上之ㄉ絃雖無人去彈，亦必自然隨之發音。

但是此種『同聲相應，』有一個先決條件。卽是必須兩個聲音高度，（按卽顫動數）恰恰相同而後可。因爲兩聲之所以能相應係由於甲器ㄉ絃既經彈動以後。其顫動直接傳入空氣。又因此種空氣之震盪，把旁邊那件乙器上之ㄉ絃掀動。假定甲器ㄉ絃係每秒鐘之內顫動一百次。則空氣陸續受其震盪者亦一百次。乙器ㄉ絃受該空氣之掀動者亦一百次。彼此動作完全一致。換言之。甲器ㄉ絃向着左邊顫動時。則旁邊空氣以及乙器ㄉ絃，亦復向着左邊動去。反之。當其甲器ㄉ絃向着右邊動回時。則旁邊空氣以及乙器ㄉ絃，亦復向着右邊動回。

現在假定乙器ㄉ絃之音，其高度不與甲器ㄉ絃相同。換言之。甲器ㄉ絃係每秒鐘之內顫動一百次。而乙器ㄉ絃則每秒鐘之內只顫動七十次。（其音較之甲器ㄉ

紘爲低）於是當其甲器d紘以及旁邊空氣正向左方顫動之時。而乙器d紘則因其自身動力之故。往往偏要向着右方動去，不能一致合作。其結果乙器d紘之顫動，既不能從心所欲動去。又不願甘隨他人俯仰。因此之故。不能繼續顫動，以與甲器d紘相應。

（二十四）響板作用

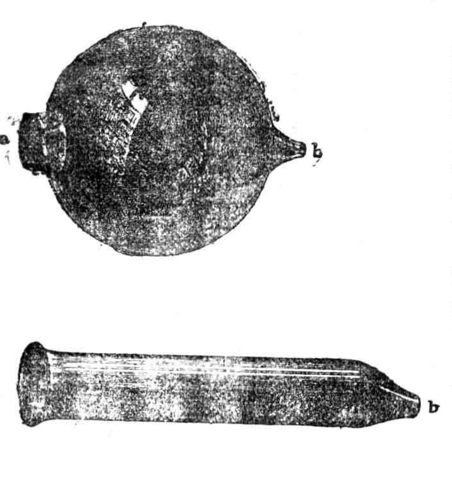
假如我們有一根絲紘。先用兩手將其兩端握住。並在空中緊張起來。然後再使其他一人彈之。則該紘所發之音必甚微弱。現在假如我們把該紘兩端扣在一個木板之上，然後再彈。則其所發之音必較前此爲强大。此其故無他。因爲該紘張於空中之時。其顫動結果，只能震盪紘身周圍所有之空氣『分子』。因而顫動面積甚小。故其發音亦弱。現在若將該紘改置板上。則其顫動結果，影響及於木板全面所有板上空氣『分子』，無不受其震盪。更由此以搖動四圍空氣『分子』。因而顫動面積較大。故其發音亦較强。至於木板之面，或爲水平，或係凸式，皆無不可。

現在我們再用一根『定音叉』（請參看附圖二十一。）俟其發音之後，立即將該叉之柄，置在一根兩端皆未封口之筒子身上。（或一端封口亦可。）我們從此可以實驗出來。不但筒子外面空氣受其震盪。而且筒子內部空氣亦復同時顫動，分向兩端口子跑出。假如我們不用筒子而改用其他長方形木匣。（仍是兩端或一端不封口。）則其匣內空氣亦復同時顫動，實與上述筒子情形無異。因此之故。所有提琴，等等樂器。常以一種木殼爲體。以便殼外殼內空氣同時顫動。並於殼面常開有各式洞口，以通內外空氣。因而提琴之音遂得由此增强。學者通常稱呼此項木殼爲『響板』Resonanzboden。

至於『響板』之資格，不僅上述之筒子，木殼等等始具有。即其他一切形式（如球形或圓錐形之類。）之物體。只要他的中心是空的，又有一二個小小洞口以通內外空氣，而且物體自身不是過於太大或太小。皆可以作爲『響板』之用。

此外西洋物理學家又常創製一種圓球形的，或長錐形的，玻璃品的、或金屬品

的，『聽音器』Resonatoren。如下列附圖四十三及附圖四十四是也。



附圖四十三　附圖四十四

圖中a端是一圓形之口。以爲收音之所。b端則用以插入耳中。假如我們將一隻耳朵用手塞住。而其他一隻則插入此項『聽音器』。並於此時命人敲擊一根恰與此器相適之『定音叉』。則其音必特別響亮。反之。再命人另自敲擊一根不與此器相適之『定音叉』，則其音必較爲微弱模糊。（按『相適』與否係與『同聲相應』之理有關。）

因此之故。我們若替某一個音，特別配上一個相適的『響板』。則其音必特別響亮。但是我們的琵琶，提琴等等之『響板』。正不必如此。因爲琵琶，提琴之上，本不止一個音。假如我們特爲其中某一個音配上一

個相適的木殼。那麼該音必較其他各音特別響亮。而其他各音不免相形見絀。其結果發生各音强度不勻之病。所以爲琵琶，提琴等等配木殼之時，總須該項木殼，對於各音皆應一視同仁，無厚此薄彼之疵。

（二十五）音之高低與絲絃各種關係

『顫動數』與『絃長』常成反比例。反之『顫動數』與『音波進行速度』則常成正比例。換言之卽是絃愈長者則其音愈低。（按卽『顫動數』愈少。）絃愈短者則其音愈高（按卽『顫動數』愈多。）反之。『音波進行速度』愈小者則其音愈低。『音波進行速度』愈大者則其音愈高。

但是『音波進行速度』之大小，以及『顫動數』之多寡。又與該絃之緊鬆，細粗，輕重，（指『比重』而言）有關。通常是緊則音高，鬆則音低。細則音高，粗則音低，輕則音高，重則音低。

現在我們且用一種器械，如下列附圖四十五者。以資實驗。圖上共有兩根相同

之紘。其長度皆爲 a b。（按卽兩端高拱之木橋）我們若欲將該紘再拉緊一點。或去旋轉圖中木柱S。或再加重圖中鉄墜P。皆可辦到。

其結果是凡將鉄墜加重四倍九倍十六倍或二十五倍者。則其『顫動數』當增高二倍，三倍，四倍，或五倍，換言之卽是『顫動數』與『加緊倍數』之平方根成正比例。

現在假若將該紘另換一根粗的。則其結果『顫動數』與『加粗倍數』成反比例。

現在又假定將該紘另換一根質地較重者。（按卽『比重』加多之意。）則其結果『顫動數』與『加重倍數』之平方根成反比例。

附圖四十五

譬如我們若將『提琴』上四根絃子 g，d^1，a^1，e^2。一律用成同樣的絲絃。但以『緊張程度』之大小，分別其音之高低。則其結果必至 e^2 絃之『緊張程度』與 g 絃之『緊張程度』，相差非常之大。於『提琴』自身極爲有損。而且其中過緊或過鬆之絃，所發聲音常不美滿。因此之故。通常『提琴』上所用之四根絃子。其質地粗細各不相同。而『緊張程度』則大約相等。計每絃『緊張程度』爲十二磅至十八磅之譜。總計四根絃子之『緊張程度』共有五十六磅之多。

至於鋼琴各絃之『緊張程度』，一齊合計起來，共有二萬二千磅之譜。大凡善製鋼琴者，卽在其能將各絃之四種要素。（按卽長短，粗細，重輕，鬆緊，四種。）支配得當。譬如在最高音級中之各絃，理應弄得極短。但是事實上有時極感不便。於是情願將該絃等比較加緊一點，以替代縮短。又如最低音級中之各絃，理應弄得極長。但是事實上有時亦感不便。於是情願將該絃等放鬆一點，加粗一點，以替代增長。

（二十六）音程大小與絲絃長短

什麼叫做『音程』Fnterval?便是兩音高度彼此距離之遠近。通常係用絲絃長短以表明之。譬如我們有一根絲絃，其所發之音爲 c。現在我們將該絃恰恰從中按着。則該絃左邊半節所發之音爲 c^1。右邊半節所發之音亦爲 c^1。換言之。便是；

$$C^1\text{長}=\frac{1}{2}c\text{長}$$

現在假如我們又將手指改按在全絃右邊三分之一的地位上。則其結果左邊三分之二所發之音爲 g。右邊三分之一所發之音爲 g^1。換言之。便是；

$$g\text{長}=\frac{2}{3}c\text{長。}$$

$$g^1\text{長}=\frac{1}{3}c\text{長}$$

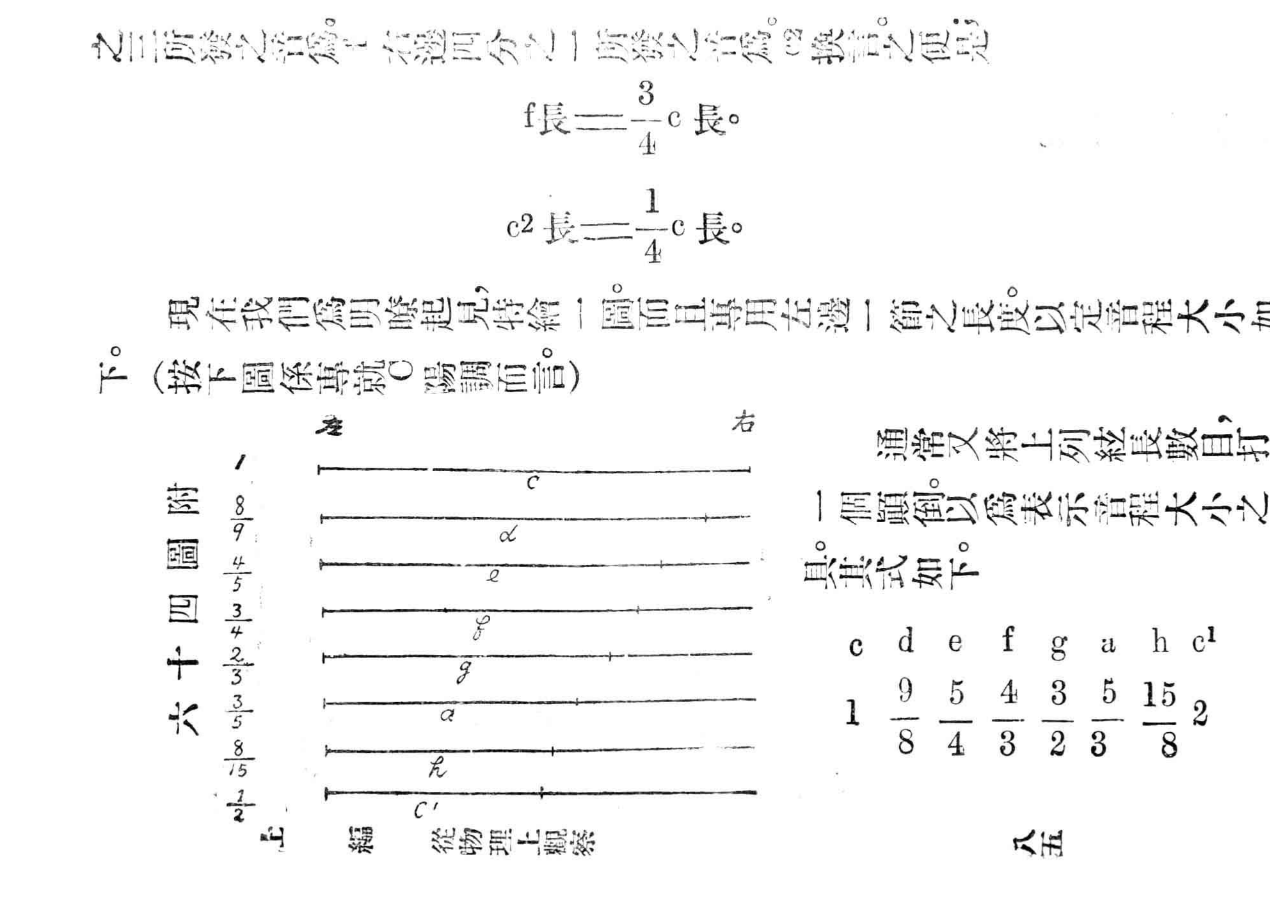
現在我們又將手指改按在全絃右邊四分之一的地位上。則其結果左邊四分

之三所發之音爲f，右邊四分之一所發之音爲c^2，換言之便是：

$$f長=\frac{3}{4}c長。$$

$$c^2長=\frac{1}{4}c長。$$

現在我們爲明瞭起見，特繪一圖，而且專用左邊一節之長度，以定音程大小如下。（按下圖係專就C陽調而言。）



附圖四十六

通常又將上列絃長數目，打一個顛倒，以爲表示音程大小之具。其式如下。

c	d	e	f	g	a	h	c^1
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2

或再將上列『分數』實地除出以資比較亦可。

c	d	e	f	g	a	h	c^1
1.	1.125	1.25	1.333	1.5	1.666	1.875	2.

現在我們再將隣近兩音間之相互距離一為詳究如下。

c–d	d–e	e–f	f–g	g–a	a–h	h–c^1
$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{16}{15}$
(大整音)	(小整音)	(半音)	(大整音)	(小整音)	(大整音)	(半音)

在音樂上最稱重要者卽爲各種『音程』Fntervoll。換言之卽在上列八個音中任取兩音而考究其音階距離之遠近，是也。茲錄其最要者如下。

(1)初階 Primr=1(如c與c兩音,彼此高低相同。)

(2)半階 Diatonischer Halbton$=\frac{16}{15}$(如e —— f)

(3)短二階 Kleine Sekunde $=\frac{10}{9}$(如d —— e)

(4)長二階 Grosse Sekunde $=\frac{9}{8}$(如c —— d)

(5)短三階 Kleine Terz$=\frac{9}{8}\times\frac{16}{15}=\frac{6}{5}$(如a —— c^1)

(6)長三階 Grosse Terz $=\frac{9}{8}\times\frac{10}{9}=\frac{5}{4}$(如c —— e)

(7)純四階 Reine Quarte $=\frac{9}{8}\times\frac{10}{9}\times\frac{16}{15}=\frac{4}{3}$(如c —— f)

(8)三整音 Tritonus $=\frac{9}{8}\times\frac{10}{9}\times\frac{9}{8}=\frac{45}{32}$（如f——h）

(9)純五階 Reine Quiute $=\frac{9}{8}\times\frac{10}{9}\times\frac{16}{15}\times\frac{9}{8}=\frac{3}{2}$（如c——g）

(10)短六階 Kleine Sesxte $=\frac{16}{15}\times\frac{9}{8}\times\frac{10}{9}\times\frac{9}{8}\times\frac{16}{15}=\frac{8}{5}$（如e——$c^1$）

(11)長六階 Grosse Sexte $=\frac{9}{8}\times\frac{10}{9}\times\frac{16}{15}\times\frac{9}{8}\times\frac{10}{9}=\frac{5}{3}$（如c——a）

(12)短七階 Kleine Septime $=\frac{10}{9}\times\frac{16}{15}\times\frac{9}{8}\times\frac{10}{9}\times\frac{9}{8}\times\frac{16}{15}=\frac{10}{9}$（如d—$c^1$）

(13)長七階 Grosse Septime $=\frac{9}{8}\times\frac{10}{9}\times\frac{16}{15}\times\frac{9}{8}\times\frac{10}{9}\times\frac{9}{8}=\frac{15}{8}$（如c——h）

(14)純八階 Oktave $=\frac{9}{8}\times\frac{10}{9}\times\frac{16}{15}\times\frac{9}{8}\times\frac{10}{9}\times\frac{9}{8}\times\frac{16}{15}=2$（如c——$c^1$）

在音樂術語上。常稱上述各種『音程』爲『比較高度』。換言之。卽比量兩音相距之遠近，而規定其高度是也。此外還有所謂『絕對高度』。換言之。卽規定某音高度，應爲若干『顫動數』是也。『比較高度』在音樂上極爲重要。而『絕對高度』則次之。譬如西洋a^1音普通定爲435『複顫動』。其實定爲434，或436，皆無不可。（假如a^1音高度變更。其他各音依照『音程』嚴格計算。其結果亦當然隨之變更）

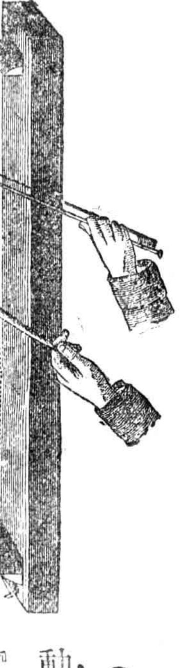
不過假如奏樂者既不止一人。所用之樂器亦不止一種。則事實上便不能不彼此規定一種共同的『絕對高度』。否則兩種樂器之音，勢將高低不齊也。因此之故。一八八五年維也納之『國際音樂會議』。遂採取前此巴黎大學一八五八年所規定之a'音高度870『單顫動』（按德國則稱爲435『複顫動』。請參看前面第二節。）爲『模範高度』Normalton。所有各國一切樂器之a'音。皆須照此絕對高度）規定。（按前此各國所定之『絕對高度』，彼此相異。）而其他各音『則當然依照音程大小嚴格計算。亦從此各有一定之『絕對高度』。惟上述音程種種，係專

指『純正音階』而言。至於風琴或鋼琴上所用之音程，則因受『十二平均律』限制之故。其間大小距離除『初階』與『純八階』兩種外。皆不復嚴格計算。譬如在『純正音階』中，『純五階』當爲$\frac{3}{2}$。而在風琴或鋼琴上所用之，『純五階』則爲$\frac{433}{289}$左右。所以歐洲識者常以風琴或鋼琴之音不純爲病，而思有以改革之也。

（二十七）絃上之部分顫動

我們在前面第（二十一）節『立音波』之說明裏面。曾經認識了兩個專門名詞。一曰『結點』。二曰『動腹』。現在假如我們有一個『一絃器』。而且用手將絃彈動。則該絃兩端扣住之處，立成『結點』。而中間則形成『動腹』。是爲『全絃顫動』。由此所發之音，是爲該絃最低之音。其顫動數我們假定爲 20。假如我們現在左手持一羽莖觸在該絃最中一點。而另用右手握一弓絃在右邊一段以拉之。則該絃除左右兩端兩個『結點』外。另於中間再添上一個『結點』。而左右兩段各自形成一個

『動腹。』如下列附圖四十七。然而且每一個『動腹，』各別自爲顫動。由此所產出之音。其高度倍於原來全絃所發之音。換言之。卽20×2＝40是也。



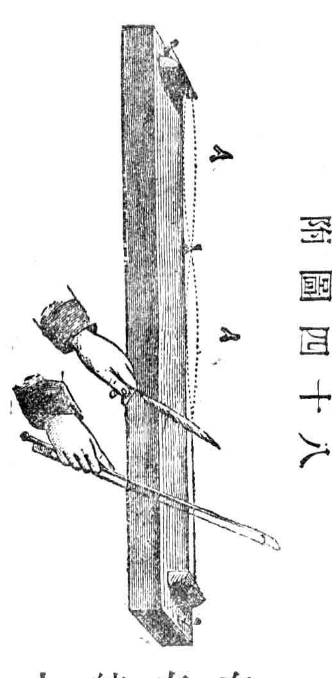
附圖四十七

假如我們的眼力，對於左邊一段（按卽未用弓絃去拉之一段。）之顫動，不甚看得淸楚。最好用兩個『紙叉』其一恰恰置在中間『結點』之上。（按卽上圖羽莖接觸之處。）其他一個則恰恰置在左邊一段之中部。則其結果當弓弦在右段拉拖之時。中間『結點』上之『紙叉，』安然不動。而左段中部之『紙叉，』則從絃上跳開。恰如上圖所示。此無他故。因『結點』本來不動。而『動腹』則常在大動特動之中也。

假如我們現在再將左手羽莖，移在該絃右邊三分之一的上面。則同時左邊三分之二的中間，又將造成一個『結點，』兩個『動腹。』其結果該絃之上，共有四個『

結點』三個『動腹』每一個『動腹』長度，恰等於全絃長度三分之一。而且每一個『動腹，』各別自爲顫動。其所產出之音，恰較原來全絃所發之音高三倍。換言之卽20×3＝60是也。(請參看下列附圖四十八)

附圖四十八



假如我們現在再將左手羽莖移在該絃右邊四分之一的上面。則同時左邊四分之三內面，又將造成兩個『結點，』三個『動腹。』其結果該絃之上，共有五個『結點，』四個『動腹。』每一個『動腹』長度，恰等於全絃長度四分之一。而且每一個『動腹，』各別自爲顫動。其所產出之音，恰較原來全絃所發之音高四倍。換言之卽20×4＝80是也。(請參看下列附圖四十九。)

假如我們現在再將左手羽莖移在該絃右邊五分之一的上面。則同時左邊五分之四內面，又將造成三個「結點，』四個『動腹。』其結果該絃之上共有六個『結點，』五個『動腹。』每一

附圖四十九

個『動腹』長度，恰等於全絃長度五分之一。而且每一個『動腹，』各別自為顫動。其所產出之音，恰較原來全絃所發之音高五倍。換言之。即20×5=100是也（請參看下列附圖五十。）

附圖五十

如此類推下去。尚可將該絃分為六個，七個，八個，九個，十個，等等「動腹，』各別自為顫動。

至於此種『部分顫動』之成立。

與前面所述『立音波』原理極有關係。當其我們左手將羽莖觸在該絃最中一點時。(如附圖四十七)。卽無異將該絃截爲兩段。羽莖所觸之點。卽無異右邊一段之終端。所以右邊一段形成一個『動腹』，自爲顫動。但該項羽莖僅僅微觸絃上，未能完全按緊。其結果右邊一段之顫動，因而影響及於左邊一段，所以左邊一段亦復隨之顫動。

又附圖四十八中左手羽莖係觸在該絃右邊三分之一的點子上面。因而右邊一段長度恰爲全絃三分之一。(其所發之音較之原來全絃所發之音高三倍)。左邊一段長度恰爲全絃三分之二。現在右邊一段之顫動既影響及於左邊一段。則左强一段之顫動，亦不能不完全依照右邊顫動條件以行之。(請參看前面附圖二十六中之第三圖)。其結果左邊一段亦復分爲兩個『三分之一』每一個「三分之二」所發之音，亦恰較原來全絃所發之音高三倍。(此外附圖四十九之分爲四個「四分之一」附圖五十之分爲五個『五分之一』其理由與附圖四十八全同)。

(二十八)高音

依照前節所述絃之顫動形式。可以分爲『全絃顫動』(指中間毫無『結點』者而言)。與『部分顫動』(指中間有『結點』者而言)。兩種。由『全絃顫動』所發之音，我們稱爲『基音』Grundton是爲該絃最低之音。由『部分顫動』所發之音，我們稱爲『高音』Oberton。以其常較該絃『基音』爲高，故也。大凡每根絲絃顫動之時，常於『全絃顫動』之外，還同時附帶許多『部分顫動』。因而每根絲絃所發之音，並不是僅僅一個單純『基音』。而是該絃『基音』與其各種『高音』所混合而成之音。其實不但絃上如此。所有通常各種樂器上發出之音，除一二例外，幾乎無一不是『混合音』。

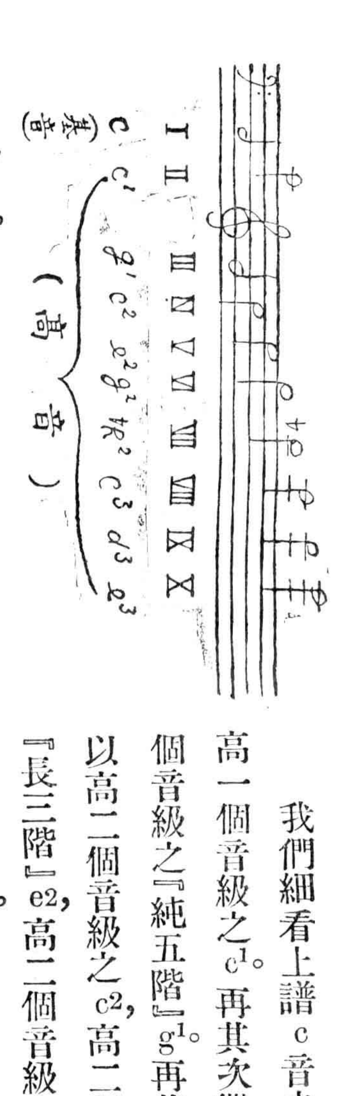
現在我們假定該絃『基音』之『顫動數』爲20。則同時至少尚含有下列各種『高音』(按卽由各種『部分顫動』所生者。)在內。(按下列表中羅馬數字，係指『分音』Partialton而言。所謂『分音』者，蓋指該絃爲『混合音』中之一分子，故也。)

附圖五十一

音名	分音	顫動數	該絃顫動情形
基音	I	20	因全絃顫動而得者。
第一高音	II	20×2	因全絃分爲二個「部分顫動」而得者。
第二高音	III	20×3	因全絃分爲三個「部分顫動」而得者。
第三高音	IV	20×4	因全絃分爲四個「部分顫動」而得者。
第四高音	V	20×5	因全絃分爲五個「部分顫動」而得者。
第五高音	VI	20×6	因全絃分爲六個「部分顫動」而得者。
第六高音	VII	20×7	因全絃分爲七個「部分顫動」而得者。

誠然『高音』之數，並不止此。但在鋼琴之上，吾人耳覺所能聽出之『高音』，則僅至第五『高音』而止。此外尚有他種樂器，其『高音』之數往往超過『第五』以上，猶

能清晰聽出者。現在我們再假定『基音』爲c。則其結果可以得出下列譜中各種『高音』



二十五圖附

我們細看上譜c音之次。繼以高一個音級之c^1。再其次繼以高一個音級之『純五階』g^1。再其次更繼以高二個音級之c^2，高二個音級之『長三階』e^2，高二個音級之「純五階」g^2，等等。皆與『基音』c諧和。自$♭h^2$以下則間有不諧和者。（如$♭h^2$與d^3對於基音c便無諧和關係。）

我們假若在鋼琴之上將c鍵按一下。最初因『基音』較强之故。將各種『高音』之聲掩去。所以我們只聽見基音c。但是稍後『基音』强度漸弱。因而各種『高音』至

是逐次顯露頭角。凡曾經練習過之耳朵，皆可以明白聽出其餘c'，g^1，c^2，e^2，g^2，各種『高音』。

(二十九)絃上分音之毀滅

絃上『分音』之毀滅，與『羽莖觸處』極有關係。譬如該絃正値三個『部分顫動』之際。(如下列附圖五十三所示。)除兩端之『結點』AB外。其間尚有兩個『結點』CD。假如我們現在將羽莖觸在C點或D點之上。則該絃三個『部分顫動』並不受其妨礙。因『結點』本來不動故也。但是我們假如改將羽莖觸在CD中間之E點上。則三個『部分顫動』立卽同時毀滅。因爲E點恰在CD『動腹』之正中。『動腹』既受此阻礙。因而不能往來顫動。所有絃上三個『部分顫動』，亦皆因連帶關係，同時陷於銷滅。不但E點如此，卽改置F點(AC之中)或G點(DB之中)之上。亦無不然。

附圖九十三

因此之故假如我們將羽莖觸在全絃最中一點之上。（譬如E點）則該絃之『第I分音』（按即『全絃顫動』）與『第III分音』（按即三個『部分顫動』）皆因其『動腹』受了阻碍不能成立而『第II分音』（按即二個『部分顫動』）與『第IV分音』（按即四個『部分顫動』）則不受阻因E點適爲其『結點』故也。

絃上『高音』之毀滅，又與『弓弦拉處』亦有關係。譬如我們有絃一根。其長與上列附圖五十三中之AB相等。其間不用羽莖去觸。但將弓弦放在該絃恰恰三分之一的地方以拉之。（譬如D點）則該絃之『第III分音』，『第VI分音』，『第IX分音』，皆不能成立。因爲D點原係此項『分音』之『結點』。現在既用弓弦迫之顫動。則不啻取消其『結點』資格。因而該項『分音』亦復不能成立矣。（請參看下列附圖五十四。）

A（結点） F C（結点） E D（結点） G B（結点）

附圖五十四

因此之故。鋼琴各絃（指中部幾個音級之絃而言。）承受鎚擊之處。每在該絃七分之一，或九分之一的點上。因爲如此一來。則該絃之『第 VII 分音』。或『第 IX 分音』。便不能成立。蓋此處之用鎚子擊打與附圖五十四中之用弓弦去拉，其理一也。至於何以獨欲避去『第 VII 分音』與『第 IX 分音』? 則因此兩個『分音』與該絃『基音』不甚諧和故也。請參看附圖五十二中之VII(oh²)IX(d)兩音。卽與 I (e) 音，無諧和關係。

1/3
A（結点）　D　B（結点）
此處用弓弦拉之

(三十)絃上之直線立音波

以上數節，所講絃上產音之道。皆係屬於『曲線立音波』一類。

凡在普通絲絃樂器上所用之手彈。弦拉，鎚擊。各項方法。蓋無一不屬於『曲線立音波』方面。至於絃上產生『直線立音波』之事。比較罕見。但不是絕對沒有。譬如我們將絃左右兩端扣緊。然後再用一小塊曾經松香擦過之破布，將絃裹住。從該音左端

起一直拭到右端止。因而絃中『分子』皆成『直線式』的向右擠去。由此發生『濃密作用』與『稀薄作用』。以產出『直線立音波』。(請參看前面第二十二節)

至於該絃由『直線音波』所產之『基音』,常較該絃由『曲線音波』所產之『基音』爲高。此外關於各種『高音』之產生,其情形與前面第二十八節所述者全同。

(三十一)方條發音之理

關於方條發音原理。我們亦可以分爲(甲)『直線立音波』,與(乙)『曲線立音波』兩種。茲請分述如下。

(甲)關於『直線立音波』者。　此例之中又可分爲(子)(丑)(寅)三種敘述如下。

(子)假如一根方條,將其左右兩端扣住。亦用破布從左至右拭之。則由此所產之『直線立音波』,其情形與上面第三十節所述之絃上『直線立音波』相同。茲不贅述。

(丑)現在我們假定該條左端扣緊，而右端則不扣住。仍用破布自左至右拭之。又將作何現象。關於此種演進情形，實與前面第二十二節中之(甲)例全同。換言之。該條顫動，其『結點』若只有左端一個，則發爲『基音』。(按卽『第I分音』)若有兩個『結點』存在，則除左端一個外，其他一個當在全條三分之一的上面。(指接近右端一段而言)。由此所發之音，是爲『第III分音』。若有三個『結點』存在，則其所發之音爲『第V分音』。由此我們可以看出此種一端扣住一端未扣之方條與前述(子)例兩端皆扣之方條。所發『分音』次序，各自不同。譬如

(子)兩端皆扣之方條。其『分音』次序如下。

分音次序： I II III IV V VI VII 等等

(基音)　　(高音)

(丑)一端扣住一端未扣之方條。其『分音』次序如下。

分音次序：I III V VII IX 等等

（基音）I　（高音）III V VII IX

再明白一點講來。便是假如方條係兩端皆扣。則其『分音』計有(I)(II)(III)(IV)……等等全體次序。反之若係一端扣住，一端未扣。則其『分音』只有(I)(III)(V)(VII)……等等奇數次序。此外該條由(子)例所發之『基音』常較該條（指條子大小長短質地一切條件相同者。）由(丑)例所發之『基音』高一個音級。

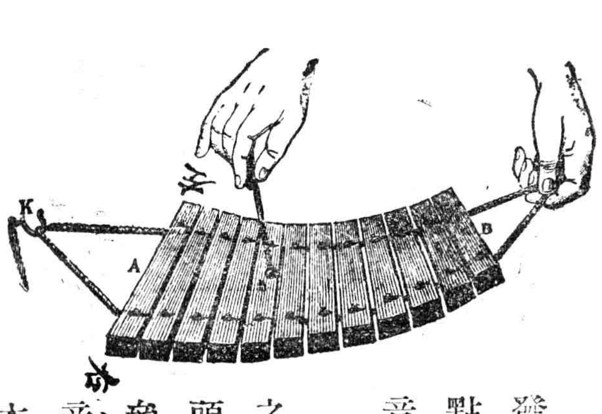
(寅)現在我們再設一例。假如那根方條左右兩端皆不扣住，則其所產之『基音』與『高音』又如何？於此可以作一簡單答案。曰由此所產之『基音』與『高音』，與由(子)例所產之『基音』及『高音』。其高低次序，彼此完全相同。

(乙)關於『曲線立音波』者。此例亦可分爲(子)(丑)二種敍述如下。

（子）假如我們在一根兩端未扣的方形木條（金屬的亦可）中段用錘一擊。（如下列附圖五十五中之h。）於是該條左右兩段，各自形成一個『結點』。而且左段那個『結點』，距離左端稍稍不及全條長度四分之一遠。同樣右段那個『結點』，距離右端亦稍稍不及全條長度四分之一遠。由此所發之音，是爲『基音』

下列附圖五十五。卽西洋所謂『取律風』Xylophon者是也。此種樂器在暹羅爪哇一帶，尤佔重要位置。本圖所繪係由十二根長短不同的方形木條所組成。每條各具一音。用錘擊之，卽能成聲。該條左右兩畔。係用兩根蔴繩穿聯起來，組成一串。蔴繩穿聯之處，卽其『結點』所在之地。或不用蔴繩穿聯。但將各根木條依次放在兩條草帶之上亦無不可。不過草帶與木條接觸之處。仍須恰在『結點』之上。（按上面文中所謂左右兩端，係就木條自身而言。若就圖中奏樂者地位而論。則又當改稱爲下上兩端方爲適當也。）

附圖五十五



前文曾言每根木條之，上各有兩個『結點』，由此所發之音，是為『基音』。但是假如該項木條如有三個『結點』以上，當然亦可以發出各項『高音』。不過此種『高音』多與『基音』不甚諧和。總以避免為佳。

又在絃上所成之『曲線立音波』，其中各『結點』間之距離部分，常常彼此相等。而且最末一個『結點』距『端頭』之長度，恰等於彼之隣近那個『部分』長度之半。（請參看前面附圖三十六），現在由木條上所成之『曲線立音波』，其『結點』位置則不盡照此種規則。此其故無他。因木條內部所具抗力，較絲絃所具者為大。所以該條每被錘擊之際。其內部常有一種頑強之抵抗。非若絲絃之易於隨人彎曲。因而『結點』位置亦常受此種抗力之影響，而生若干之變態焉。其實此種變態卽在較為粗堅之絲絃

上亦常不免。因此之故。前面第二十一節內所謂鐵絲。係指一種非常纖細者而言。若稍粗一點，則其變態百出矣。

（丑）假如我們有一根鐵條。將其一端扣緊，而他端則不扣住。由此所產生之『曲線立音波。』其式如下。

附圖五十六

右
A
B
C

上列附圖五十六中之A。係表示該鐵條只有一個『結點。』其所發之音，為『基音。』B係表示該鐵條共有兩個『結點』而且右邊那個『結點』與右端端頭之距離特別短小。不及彼之隣近那個部分（按卽圖中左邊兩『結點』間之部分。）長度之半。至於C圖則係表示三個『結點』之狀。其『結點』距離亦大小不等。總之，距左端（按卽扣緊之一端）愈近者。則其部分愈大。

又前面數節曾謂絃之長短與『顫動數』之小大，成反

比例。換言之。卽絃之長度減短若干倍者，則『顫動數』增加若干倍。（按卽音高若干倍。）現在由鐵條上所發之『曲線音波』則不然。其式如下。

凡條之長度減至一半者，則其『顫動數』應以四乘之。

凡條之長度減至三分之一者，則其『顫動數』應以九乘之。

凡條之長度減至四分之一者，則其『顫動數』應以十六乘之。

換言之。『顫動數』之大小，與該條減短倍數的平方，成反比例。

至於我們通常所用之『定音叉』。其顫動情形亦屬此類。我們細看前面附圖四中兩根條子下部。（按卽彎曲之部。）各有一個『結點』因而每根條子如同『一端扣緊一端未扣』的條子一樣。由此所發之音，是爲『基音』。

假如每根條子之上，各有二個『結點』則亦可以發出一種『高音』。但此種『高音』頗較通常爲高。大約比較『基音』高出5.8倍以至於6.6倍之譜。（其高度與附圖五十一中之第 VI 分音相似。）因此之故。『基音』與『高音』之間甚不諧和，是

其短處。然就他方面觀之。『高音』旣遠較『基音』爲高。且鳴響不久卽止。因而對於『基音』所起之混合作用。遠較其他樂器爲少。使我們對於『基音』之認識。更爲確切清楚。

但在事實上每當『定音叉』發音之後。我們亦常聽見一種『分音』，其高度與前述之『第II分音』相等。(請參看附圖五十一)不過此種『分音』非『定音叉』自身所發。乃係該叉周圍空氣所鼓盪而成者也。

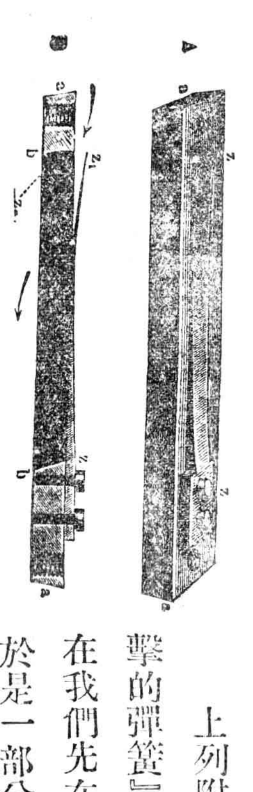
(三十二)彈簧發音之理

彈簧 Zungen 係金屬長片所製成。假如我們一旦使之顫動。其自身本具有一種發音能力。但在普通『小風琴』Harmonium 或『大風琴』Orgel 內之各種彈簧。其作用卻不在其自身發音。而在其因彼顫動之故，使附近空氣發生『濃密』或『稀薄』作用。由此(空氣)以成聲音。

風琴內之彈簧，計有兩種。一爲『穿擊的彈簧』Durchschlagende Zungen。一爲

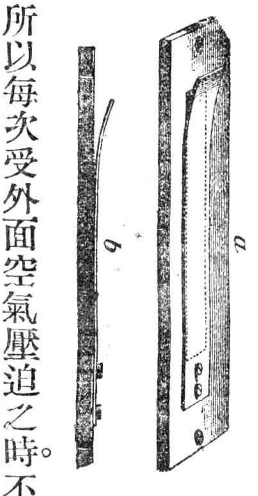
『上擊的彈簧』Aufschlageude Zungen，前者彈簧片子寬窄，恰與其旁長方形空隙之寬窄相等。（請參看下列附圖五十七中之A。）因而彈簧片子能自由出入空隙。穿來穿去。後者彈簧片子寬於其旁空隙。（請參看下列附圖五十八中之a）因而彈簧片子只能在空隙之上打擊。不能自由穿過。

附圖五十七



上列附圖五十七中之B。係將『穿擊的彈簧』從中截爲兩半，以便研究現在我們先在彈簧之上。使空氣濃密起來。於是一部分空氣從彈簧一端（如圖中之Z_1）穿入隙內。發生『濃密作用』。但同時彈簧自身因受上面空氣壓迫之故。逼得往隙內鑽。（如圖中之Z_2）因而將隙口塞住。外面濃密空氣從此不能再行侵入。其後又因彈簧自身彈力作用之故。開始向外退回。（仍如圖中之Z_1）隙口復開，空氣又

得從新侵入。如此者往來不已。一直等到外面空氣停止壓迫，然後罷休。因爲空氣頻頻撞入隙內之故。所以發生聲音。至於聲音之高低，則以空氣每秒鐘撞入隙內次數之多寡爲轉移。（按即空氣之『顫動數』。）而空氣每秒鐘撞入隙內之次數多寡，又以彈簧厚薄短長爲轉移。不過彈簧自身責任。只在規定空氣顫動次數，而不在自身發出聲音也。



附圖五十八

上列附圖五十八中之b。係將『上擊的彈簧』從中截爲兩半。其產音原理與上述『穿擊的彈簧』相同。所異者因爲此處彈簧寬於隙道。所以每次受外面空氣壓迫之時。不能直接侵入隙內，只在上面將隙口閉住而已。因此之故。打來打去，附帶許多『噪響』Gerausch 在內。遠不及『穿擊的彈簧』之美。爲免除此種噪響計。不得已另於隙邊之上。被以軟革，爲之救濟。

『穿擊的彈簧』爲吾國人所發明卽吾國笙內所用者是也。自西歷第十八世紀始由俄國而入歐洲。因而歐洲乃有『小風琴』Harmonium之發明。(按卽吾國普通學校所用之西洋脚踏風琴。)其中布置卽係全用此種『穿擊的彈簧』之原理者也。

此外『手拉風琴』Ziehharmonika,『口吹風琴』Mundharmonika之彈簧。亦皆屬於此類。

惟上面所述彈簧之動。係由於空氣之『壓力所迫』。此外美國方面所製之風琴又間有採用吸力者。換言之。彈簧之動,係由於空氣之『吸力所引』。總而言之。彈簧旣動之後。一往一來。常將隙口封住或揭開。因而外面空氣之鑽入隙內。亦復斷續不已。由此以產出聲音。而且此種聲音之中,除『基音』外,常附帶許多『高音』在內。

又『大風琴』Orgel之中,亦間有改用『穿擊的彈簧』者。但仍舊保存『上擊的彈簧』者亦復不少,而且在上加一形如漏斗之物以增强其音。

附圖六十

漏斗形

附圖五十九

d
p
靴部
p
足部

上列附圖五十九及附圖六十皆爲『大風琴』中之彈簧構造形狀。最初空氣由『足部』Fuss以入『靴部』Stiefel。（按卽附圖五十九中之PP。）將『彈簧』l掀動。往來不已。因而空氣鑽入隙內。（按卽附圖五十九中之rr。）亦復斷續不已。更於其上穴口V中，插一漏斗形之物，以增強聲音。此外圖中尙有一根竿子d，其下部將『彈簧』緊緊按住，以便規定『彈簧』活動之長度。換言之，竿子愈往下移，則『彈簧』能

動之長度愈短而所發之音亦愈高。

(三十三)風管發音之理

在『大風琴』之中。除上述『彈簧』外，尚有『風管』Labialpfeifen 一種。而且分爲『封頂風管』Gedackte Labialpfeifon，(其中又分『全封』與『半封』兩項)與『敞頂風管』Offene Labialpfeifen，兩類。其式如下。

附圖六十一

附圖六十二

上列附圖六十一爲金屬的『封頂風管』之外形。附圖六十二則爲木質的『敞頂風管』之內形。

上列附圖六十二係將『敞頂風管』切爲兩個半邊。以便研究圖中最下之部稱爲足部。再上則爲『風室』Kammer。(按卽圖中之K。)『風室』之上是爲『底板』Kern；其一側恰與『下唇』Unterlippe，組成一條『縫口』Kernspalte。(按卽圖中cd一條『縫口』)『下唇』之上又有一個『上唇』Oberlippe，(按卽圖中ab。)與之對立。是爲『風管』入口之道。圖中RR卽係『風管』自身。

現在我們先使空氣從『足部』以入『風室』。再由『風室』轉到『縫口』cd。其時空氣因受『縫口』支配之故。所以奔出『縫口』之時。恰恰形成一根帶子之狀。我們可以簡稱之爲『氣簧』LuftZung。

這根『氣簧』既離縫口之後。直向高頭之『上唇』ab衝去。時而衝在『上唇』外部。時而又衝在『上唇』內部。(按卽風管之內。)因而發成聲音。由此觀之。『氣簧』對於發音之事。極有重要關係。但西洋學者對此見地。亦復不能一致。茲舉最重要之學說二種如下。

第一說；以爲『氣簧』撞在『上唇』之上，卽已成音。而且我們按照此音高度，與之配一適當『響筒』Resonanzrohre，以使其音增强，是爲『風管』。當其『氣簧』觸在『上唇』產出聲音之後。同時『風管』之內亦受此鼓盪製成一種『立音波』與之相應。

第二說；則以爲音之成立係由於『風管』內之空氣時而『濃密』，或時而『稀薄』所致。至於『氣簧』自身則僅爲促使管中空氣成爲『濃密』或『稀薄』之一種『動力』而已。譬如『氣簧』時而撞在『上唇』內部。則管中空氣受此打擊忽起『濃密作用』。反之『氣簧』時而又撞在『上唇』外部，則管中空氣又向外洩成爲『稀薄作用』。此種『濃密』或『稀薄』之作用。每至『風管』頂頭之際又復反射下來。如是者上下頻仍。在管中構成一種『立音波』。是爲聲音成立之源。

總之。『氣簧』與『風管』皆與音之成立有關。不過第一說以『氣簧』爲主而以『風管』爲副。第二說則以『風管』爲主而以『氣簧』爲副而已。

『風管』既與發音有關。所以該管之大小長短。封頂做頂。亦常與該音高低有密

切關係。

（甲）在『封項風管』內所成之『直線立音波。』其原理與前面第二十二節內甲項所講者相同。換言之。我們將該管當作一端封住（按卽管項一頭。）一端末封（按卽『氣簧』所在之一頭。）之筒子看待。假如該管只有一個『結點。』則該點所在之處，當在管項一頭；而『氣簧』所在之一頭，則爲『動腹』；是爲一個『四分之一音波』；其所發之音，稱爲『基音。』假如管內『結點』共有二個，則管內當分爲三個『四分之一音波』；由此所得之音，是爲『第III分音。』假如管內『結點』共有三個，則管內當分爲五個『四分之一音波』；由此所得之音，是爲『第V分音。』如此類推下去。總而言之，在『封項風管』之內，所產『分音』次序爲（I）（III）（V）（VII）等等奇數。（請參看前面第三十一節甲項丑目。）

（乙）在『敞項風管』內所成之『直線立音波，』其原理與前面第二十二節內乙項所講者相同。換言之，我們將他當作兩端末封之筒子看待。如其中只有一個『

結點』則該點所在之地，必在管之中部，而兩端則各自成爲一個『四分之一音波；』相加起來成爲『半個音波』其所發之音，稱爲『基音』。假如管內『結點』計有二個，則其中共成二個『半個音波；』由此所得之音，是爲『第II分音』。假如管內『結點』共有三個，則管內當成三個『半個音波；』由此所得之音，是爲『第III分音』。如此類推下去。總而言之，在『敞項風管』之內所產『分音』次序爲(I)(II)(III)(IV)(V)等等全部，（請參看前面第三十一節甲項寅目）此與『封項風管』不同者也。

（三十四）橫笛發音之理

橫笛發音之理。亦與前面三十三節乙項之原理相同。當其我們用唇去吹笛口之時。亦是形成一個『氣簧』之狀，衝入笛內而去。假如笛上各孔皆用手指按住時。則成爲兩端未封之筒子。（其一端爲左端吹口A。其他一端則爲右端笛之盡頭處B。）如其中只有一個『結點』。則應在AB兩端中部。而兩端則各成一個『動腹』。

各等於一個『四分之一音波』其所發之音爲『基音』。

假如吹者之唇微將吹口遮着一部分同時又用一種細小而急速之氣吹入之。(按西洋稱此種吹法爲『超吹』)則笛中亦可形成二個，三個，四個等等以上『結點』由此可以得出該項『基音』之『第II分音』『第III分音』『第IV分音』等等換言之笛之『分音』次序爲(I)(II)(III)(IV)(V)等等全部。

現在我們假若將右端最末一孔C放開則事實上無異將笛子截短一節換言之我們此時又將該管長度作爲自左端唇吹之處A起至右端最末一個孔子C止。如其中只有一個『結點』則必在AC之中部，由此所得之音，是爲C孔之基音假如再用上面所述『超吹』之法以吹之則又可得出此項『基音』之(II)(III)等等各種『分音』其理與上段同。

總之笛管長度係從左端吹口(唇吹之處)起，至右端第一個放氣之處止由此所發之音，是爲『基音』每個『基音』之上，又可得着(II)(III)(IV)(V)等『分

音』。

但『笛孔』事實上比較笛子直徑爲小。（因此在理論上不能視爲完全敞口。）其結果常使所發之音過低。所以我們在笛上用刀開孔之時不能完全依照嚴格理論須將各孔略向『吹口』一頭移近。以便長度減短，聲音增高。茲將西洋橫笛二種圖繪如下。

附圖六十三

Die Holzflöte, System Böhm.

附圖六十四

Reformflöte, Modell Schwedler und Kruspe (Leipzig) vom Jahre 1910.

(三十五)洋簫發音之理

『洋簫』Klarinette 亦係木質樂器之一種。與笛子同。(按西洋笛子係用木料所製。與中國之用竹製者相異。) 上端之側有一方形之口。其上蓋以蘆葉一方。(如下列附圖六十六及附圖六十七。) 吹者以其上端納入口中吹之。簫之中部更有若干孔子。以定音之高低。

附圖六十五

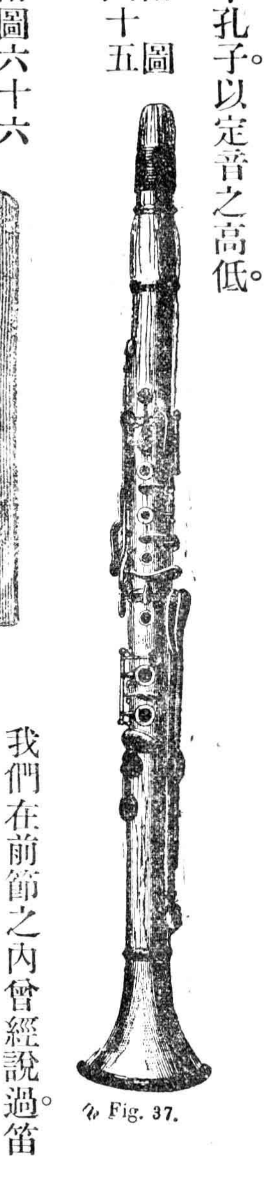


Fig. 37.

附圖六十六

附圖六十七

我們在前節之內曾經說過笛子發音之理頗有類於『大風琴』中之『風管』。換言之。皆以『氣簧』爲其動力，而『風管』定其高度。(指音之高度而言。) 現在所講之洋簫。則

其發音之理，又有類於『大風琴』中之『彈簧』。換言之『彈簧』往來顫動，將隙口忽開忽閉因而空氣衝入隙內，亦復忽斷忽續由此以發聲音。

但是『大風琴』之彈簧，係金屬製成的。係一種『硬彈簧』。能直接規定音之高低。（按音之高低係由於空氣衝入次數之多寡。而空氣衝入次數之多寡，又以該彈簧往來顫動次數之多寡爲準。）在『洋簫』上之彈簧，係蘆葉製成的。係一種『軟彈簧』。不能直接規定音之高低。所以只好乞靈於管子長短及孔子遠近。一如橫笛之所爲。（按卽倚賴管中『立音波』之小大而定其音之高低。）

又橫笛中所產之『直線立音波』。在理論上視爲兩端未封之筒子。故其『結點』在兩端之中部。（假如所發者係『基音』）而洋簫中所產之『直線立音波，』在理論上則視爲一端封口（指上端口吹之處而言）一端未封（指下端而言）之筒子。故其『結點』常在上端。而下端則爲『動腹』。其所發之音，是爲『基音』。至於管子長度，亦常以上端吹口至下端第一個放氣之處爲準。因而每孔皆可產出一

個『基音』其理由與橫笛同。

倘簫中『結點』共有二個則由此所發之音是爲該項『基音』之『第III分音』。如有三個『結點』則由此所發之音，是爲該項『基音』之『第V分音』。換言之其『分音』次序爲(I)(III)(V)(VII)(IV)等等奇數與『封項風管』同而與橫笛則相異。

因此之故橫笛上之孔子數目只要能將一個『音級』Oktave中之十二個音吹出已足其餘較高音級之音，皆可利用『超吹』之法以得之。而在洋簫之上則因其所發之『分音』常自『第III個』起。換言之係自高一個『音級』之第五階起。因而其間缺少數音。所以只好加多孔子以補其缺。因此之故通常洋簫之上共有十八個孔子。其音域係自 e 到 ch^1。

(三十六)洋鎖喇及低音大笛發音之理

『洋鎖喇』Oboe及『低音大笛』Fagott，亦屬於木質樂器之類。其吹口係用兩片

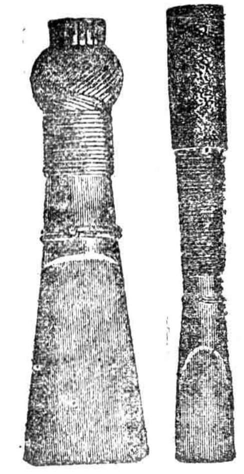
蘆葉所合成。如下列附圖七十及附圖七十一中所示者然。吹者將其上端納入口中吹之。而用手按放管上孔子，以定音之高低。故此兩種樂器，在原理上應與洋簫相同。

惟『洋簫』之管子直徑係從上至下大小相等。而『洋鎖喇』及『低音大笛』之管子。則係從上至下，逐漸放大。在物理學上。此種一端封口之圓錐式筒子。（按即從上至下逐漸放大之意。）其所產之音，與同樣長度兩端開口之圓形筒子（如笛子之類。）所產者相同。因此之故。『洋簫』與『低音大笛』亦能發出『第II分音』。非若『洋簫』之只能從『第III分音』開始也。茲將『洋鎖喇』及『低音大笛』之圖，排繪如下。（按『低音大笛』亦係豎握手中吹之。並非橫吹。讀者幸勿以一個『笛』字因而誤會）。

附圖六十九

附圖六十八





附圖七十 Oboe-Rohr.　附圖七十一 Fagott-Rohr.

（三十七）洋號角洋喇叭伸縮喇叭發音之理

『洋號角』Horn，『洋喇叭』Trompete，『伸縮喇叭』Posaune，三種皆屬於『金質吹奏樂器』Blechblasinstrumente一類。其吹口形狀，圓而且凹。奏者以其兩唇緊貼吹口之上，並使兩唇之間形成一個窄縫。其作用恰如前節所述『洋鎖喇』及『低音大笛』上之兩片蘆葉然。因口中及管中雙方空氣鼓盪之故。常使兩唇顫動，忽開忽閉。其結果口中空氣吹入管內，不免時斷時續。因而管中空氣，亦復時濃時薄。由此以造成一種『立音波』，是爲發音之源。

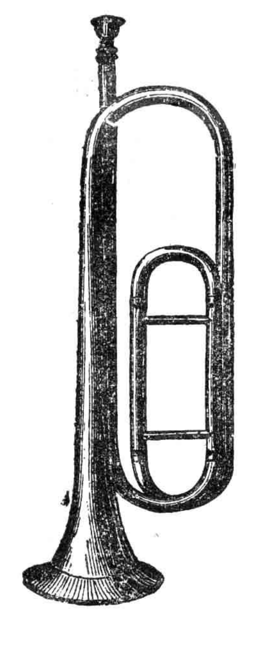
由此觀之。管中空氣實爲直接發音之源泉。因而音之高低，亦以管子短長爲轉移。又此種樂器照理論而言，本應屬於一端封口一端開口之筒子一類。換言之。其『

結點』當在上端吹口之處。而下端敞開之處則爲『動腹。』所產『分音』次序本應爲(I)(III)(V)等等奇數。但因其管子形式係從上至下逐漸放大之故。在物理學上，實與同樣長度兩端開口之管子相等。故其結果亦可以產出(I)(II)(III)(IV)等等全部次序之『分音。』其理由與前節所述之『洋鎖喇』及『低音大笛』同。

至於管子增長或減短之法。照普通所用，計有六種。茲請分述如下。

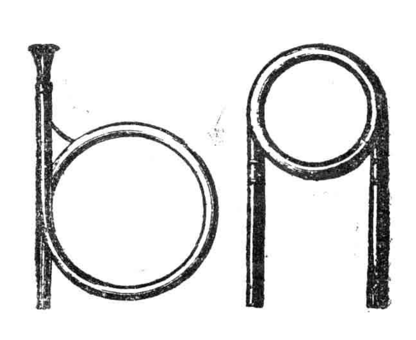
(甲)假如管子長度是已經做定了的。其旁又未開有各種孔子。則該管所發之音當限於一個『基音，』以及該『基音』所附帶之其他各種『高音。』其範圍極爲有限。不能盡將各調必需之音。同在一種樂器之上吹出。因此之故。我們對於每類樂器，皆給他造成長短不同的幾種。每種之上，各具一個『基音，』以及該『基音』所附帶之其他各種『高音。』以便奏者臨時選採一種，以應該調需要。(按下列附圖七十二卽爲『洋號角』Waldhorn 之一種。附圖七十三卽爲『洋喇叭』Naturtrompe ət 之一種。)

附圖七十二



附圖七十三

（乙）後來又覺得每類樂器同時要造出長短不同的幾種。未免太費事。因而另自造出幾個『副管』，如下列附圖七十四及附圖七十五之式。只須奏者臨時將『副管』插入該器事實上便無異將該器增長一節。



附圖七十五　附圖七十四

(丙)但是後來仍嫌此種『副管』臨時插入，頗感不便。因而發明『增長蓋』一法。所謂『增長蓋』Verlangerungsuentile者，卽於該器之上，安置三個蓋子。每按一蓋，則旁邊『副管』自然開啓。因而管子長度亦隨之增長。譬如按第一個蓋子，則降低一個『整音』。按第二個蓋子，則降低一個『半音』。按第三個蓋子，則降低一個『短三階』。若三個齊按，則降低三個『整音』。等等。下列附圖七十六及附圖七十七，卽為『洋號角』及『洋喇叭』之設有『增長蓋』者也。

附圖七十六



附圖七十七

（丁）因利用『增長蓋』之故。常使各音間之聯絡，不甚圓轉自如。因而法國方面又有『減短蓋』Verkurzungsventile之發明。此種蓋子共有六個。每按一個，則將管子減短一節。其音得以增高。此種方法，要算最善。但西洋音樂界中。因習慣難改之故。仍多沿用上述『增長蓋』之制度。

（戊）有人又想在此種金質吹奏樂器之上，亦如木質吹奏樂器（如洋鎖喇之類）之辦法。在旁邊開上幾個孔子。但由此所發之音，常將『金質吹奏樂器』之特性失去。所以亦未普通採用。

（己）此外還有『伸縮喇叭』一種。其增長減短管子之法，係將管子上下伸縮。如是者可以增長六次。下列附圖七十八中之1Z，2Z，等等符號，即係表示每次增長之限度。

附圖七十八

（三十八）鼓上發音之理

鼓之所以發音，係由於鼓上之革。因受錘擊，陷於顫動，時而向下凹去，時而向上凸起；並於該革之上，構成種種『結線』Knotenlinien，將該革分爲若干部分，各自顫動，發出種種『高音』。下列附圖七十九，卽爲鼓革顫動之狀；圖中符號，十係表示鼓革上凸，一係表示下凹，黑線係表示『結線』。

附圖七十九

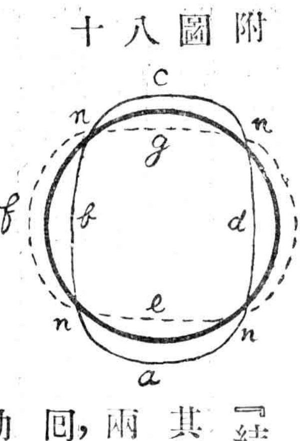
我們細看上圖，除鼓邊周圍緊扣，爲其天然『結線』外，尙有其他各種『結線』參雜其間。上列圖中之第1圖，係表示該鼓發出『基音』之動狀；其時該革全部向上或向下往來顫動，鼓邊周圍是爲『結線』。在第2圖之中，則分爲兩部顫動；除鼓邊『結線』外，尙有一根『結線』橫貫其中；而且該兩部分之顫動方向，恰恰彼此相反；譬如彼向上凸，則此向下凹；彼轉身向下凹去，則此又轉身向上凸起；由此所得之音，較之第7圖所得者爲高。其餘第3，4，5，6等圖，顫動形式，益趨複雜，由此所得之音，亦逐次增高。假如我們假定第1圖所發之音爲c，則第2，3，4，5，6等圖所發之音，便當爲as，cis^1，d^1，g^1，b^{1}等等。換言之，此種『高音』次序，與我們前面所述各節相異，此則不可不知者也。

(三十九)鐘上發音之理

鐘之所以發音，係由於鐘身受錘打擊，陷於顫動。當其該鐘發出『基音』之時，鐘身之上計有四根『結線』，係從鐘頂分向下面鐘邊而去，如地球上之『經線』從『

北極』分向下面『赤道』而去者然而且這四根『結線』恰恰將鐘身分爲四個相等部分，各自顫動，有如下圖。

附圖八十



上列圖中之『圓周線』係表示鐘。邊n點係表示『結線』盡頭之處。abcd橢圓形與efgh橢圓形，則爲其顫動之狀。當其ac兩部正分向外面動去之際，而bd兩部則共向內面動來。反之，當其ac兩部轉身向內動回，成爲eg形狀之際，而bd兩部亦復同時轉身向外動回，成爲fh形狀。如此往來顫動，因而成音。

假如鐘身之上，計有六根，八根或十根『結線』從鐘頂分向下面鐘邊而去，將鐘身分成六個，八個或十個相等部分；則其所發之音比較『基音』增高四倍，九倍或十六倍。換言之，亦與前面各節所述者不同。

(四十)提琴琵琶發音之理

提琴Violine胡琴之所以發音，係用弓弦去『拉』絲絃。琵琶，七絃古琴之所以發音，係用手指去『彈』絲絃。『弦拉』與『指彈』雖異，而所以使絲絃陷於『曲線音波』之顫動則一。關於絲絃發音之理，已在前面第二十一節二十七節等等詳述，茲不再論。惟『拉』『彈』兩種方法，對於音樂實際演奏上，却有狠大區別，則不可不知。弓弦拉絃，能使該音既發之後，或由弱轉強，或由強轉弱，或保持強度始終如一。蓋奏者用弓弦拉着絃身，可以任意輕重久暫故也。反之，手指彈絃，則該音既發之後，只有由強漸弱一種。既不能令其由弱轉強，亦不能保持強度始終如一。蓋此時奏者之手指業已離開絃身，無能爲力故也。因此之故，彈絃之人，往往用指不斷的急彈，好像聲音延長一般，冀得輕重如意之效，以補救於萬一；但在事實上終不如弓絃去拉之整一；此所以『絃拉樂器』之勢力，無論在西洋，在中國，皆超駕其他一切樂器而上之，非偶然也。（按鋼琴係用錘擊，其缺點亦正與琵琶相同。）

（四十一）管絃樂器之顫動數計算法

各種樂器之『顫動數』計算法，彼此不同。茲僅就在一切樂器中，最佔重要位置之管絃樂器，一爲說明如下。

(甲)絲絃樂器之『顫動數』。我們若欲求得某絃之『顫動數』，只須將該絃長度以二乘之，然後再以乘得之『積』去除絃上『傳音速度』之數，即得。若列爲公式，則如下。(式中符號，N係代表『顫動數』，L係代表『長度』，V係代表『速度』)

$$N=\frac{V}{2L}\text{；}\ \text{基音顫動數}=\frac{\text{絃上傳音速度}}{2\times\text{該絃長度}}$$

我們在前面第二十一節甲項，曾經講過，絃之長度，恰恰等於『半個音波』。那麼，我們若以二乘之，則成爲『一個音波』。因此之故，我們亦可以簡稱『音波長度』除『速度』，即可求得『顫動數』。

但上列公式，係專指該絃所發最低之音(按即『基音』)而言。倘該絃所發者爲

『高音』(參看前面二十一，二十七，二十八各節) 則其算法有如下式。

$$\text{基音顫動數}\times 2=\frac{\text{絃上傳音速度}}{2\times\text{該絃長度}}\times 2=\text{第一高音}$$

蓋此時絃之長度恰恰等於『一個音波』故也。(參看前面附圖二十六中之2。) 其餘第二，第三等等『高音』，則改用 3,4，等數，去乘『基音顫動數』即可求得。其理相同，不必再述。

至於絃上傳音速度之大小，則以該絃之物質材料，及鬆緊粗細，等等條件為轉移。

(乙)『管類樂器之顫動數』 在此項樂器之中，又可分為(子)兩端開口之管子，與(丑)一端開口之管子兩種；茲請分述如下。

(子)兩端開口之管子，如前面第三十三節乙項內所述『敞頂風管』以及第三十四節內所述『橫笛』之類。其計算『顫動數』之公式如下。(式中符號，N係代表

『顫動數』，大寫L係代表『管子長度』，小寫l係代表『管子補正』，V係代表『管內空氣傳音速度』。

$$N = \frac{V}{2(L \times l)}$$

我們知道，兩端開口之管子，其管子長度（在橫笛之上，則為從左端唇吹之處，至右端洩氣之處）等於兩個『四分之一音波』換言之，卽等於『半個音波』。（參看前面第二十二節內之乙項）所以我們應該用2去乘『管子長度』L，以便求得『一個音波』之長度；然後再去除『管內空氣傳音速度』，（大約天氣溫度在寒暑表零度時，每一秒鐘為332密達尺。）卽可求得該管之『基音顫動數』。

但是在實際上，管子直徑大小亦與聲音高低有關。換言之，同樣長度之管子，其直徑愈大者則其音愈低；反之，其直徑愈小者則其音愈高。此外管子洩氣之一端，其音波『動腹』亦並不是恰到該端而止，往往尚有一節超出管口之外；換言之，『音波

長度』不能嚴格依照管子長度計算；因爲管子長度，常較『半個音波』之實際長度爲短，故也。又唇吹之處，亦非大敞其口，其結果亦常使聲音向下低降。因此種種關係，所以必須於『管子實際長度』之外，還須加以一點『補正』，然後始能求得正確之『顫動數』。

(丑)一端開口之管子，如前面第三十三節甲項內所述之『封頂風管』，以及第三十五節內所述之『洋簫』等等。其計算『顫動數』之公式如下。

$$N=\frac{V}{4(L+l)}$$

在前面第二十二節甲項內，曾經講過，管子長度係等於『四分之一音波』；所以我們現在應該用4去乘『管子長度』，以便求得『一個音波』之長度。然後再去除『管內空氣傳音速度』。即可求得該管之『基音顫動數』。

但是因管子直徑等等關係之故，亦須加以『補正』，然後始可求得正確之『

顫動數』。

上述『洋簫』之所以視爲『一端開口』之管子者，蓋以該簫頂端，係含入口中，其結果該端構成一個『結點』而下端底孔，則成爲『動腹』與『橫笛』等相異，而與『洋鎖喇』『洋喇叭』等則相同。但『洋鎖喇』『洋喇叭』等之管子形式係從上至下，逐漸放大而與『洋簫』管子之從上至下大小相等者迥別。在物理學上『一端封口』之圓錐式筒子，（如『洋鎖喇』及『洋喇叭』）其所發之音與同樣長度『兩端開口』之圓形筒子，（如橫笛之類）所發者相同。因此之故，『洋鎖喇』及『洋喇叭』之『結點』』雖在吹口一端，近於『洋簫』顫動之理；而計算『顫動數』之法，則反與『橫笛』相同，而與『洋簫』相異，此則不可不知者也。

至於尋求某管『管子補正』1之法，則須取途實驗，方能求出。譬如我們有一根『一端封口』之管子，A其長度爲 0.23 密達尺，其直徑爲 0.009 密達尺，由此所得之音，其高度爲 366『複顫動』（按西洋學者普通尋求『顫動數』之法，係先將該

管一吹，細聽其音，究與『驗音器』上之何音相等；然後再查『驗音器』上之該音，究有『顫動數』若干；由此以確定該管之『顫動數』。）此外另用一根B管，其直徑與A管全同，其長度我們暫假定爲0.1074密達尺，由此所得之音，其高度爲732『複顫動』。現在我們先應用『封項管子』之公式，以推求之。（按下列式中符號N_1係表示第一根管子A之『顫動數』，N_2係表示第二根管子B之『顫動數』，L_1係表示第一根管子A之長度，L_2係表示第二根管子B之長度，換言之1,2兩字只係表示第一根管子與第二根管子之意而已，別無他項數理上之意義。）

$$(\text{A管})\ N_1=\frac{V}{4(L_1+l)},\quad (\text{B管})\ N_2=\frac{V}{4(L_2+l)}$$

由上列兩式變成下列公式，是卽物理學上所謂『一端封口管子之補正公式』是也。

然後我們再將上面所述之AB兩管之『長度』及『顫動數』實際嵌入一算，其式如下，

$$l = \frac{N_2 L_2 - N_1 L_1}{N_1 - N_2}$$

$$l = \frac{(732 \times 0.1074) - (366 \times 0.23)}{366 - 732} = 0.0152\,\mathrm{m}$$

換言之，AB兩管之『管子補正』其數爲 0.0152 密達尺。因爲『管子補正』之大小，只以管子直徑大小爲轉移，而不以管子長度大小爲轉移之故；所以假使另有一根丙管，其直徑仍與AB兩管全同，其長度則無論其爲 0.25 密達尺，或0.09密達尺均無不可。而其『管子補正』之數則永遠都是0.0152密達尺不變。

因此之故，我們任取兩根『直徑相同而長度相異』的管子，只要把他的『顫動數』先用『驗音器』尋求出來，均可嵌入上列那個『管子補正公式』以求『補正』之

數，此事因與吾國『律管』計算問題有關，故特詳述如上。

至於兩端開口之管子，其尋求『管子補正』之方法，宜照上述實驗及公式辦理。

中編　從生理上觀察

（四十二）喉頭之組織

我們人類歌喉，亦是樂器之一種。而且就其發音之理而論。頗有類於『彈簧』作用。換言之。肺部空氣由氣管以入『喉頭』Keilkopfo。『喉頭』之內有『聲帶』Stimmbauder 二根。左右對立。形成一個縫口。該縫口因受空氣鼓動之故。忽開忽合。其結果肺部空氣之衝出縫口。亦復時斷時續，因而形成一種聲音。此外更有頭部各處空隙，以代『響板』作用。

現在我們先將『喉頭』內部構造。爲解剖觀察如下。

附圖八十一

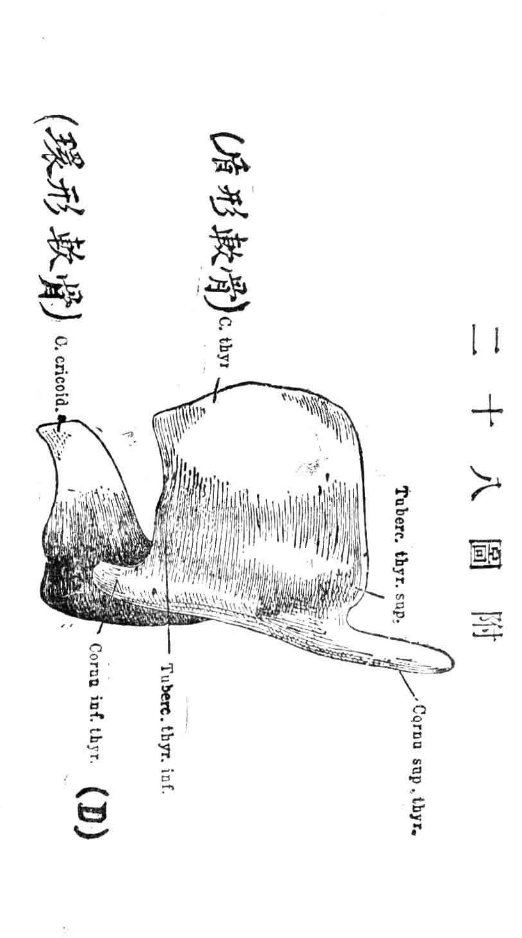
(C)
Cornu sup. thyr.
C. cornic.
C. thyr.（盾形軟骨）
Fov. triangul.
Pr. vocal. (A)
Pr. musc. (B)
（錐狀軟骨）
Cornu inf. thyr. (D)
Crista mediana
C. cricoid.（環形軟骨）

上列附圖八十一係表示『環形軟骨』，Ringknorpel『盾形軟骨』，Schildknorpel『錐狀軟骨』Stellknorpel三種構造之狀。而且由頸後看去。（著者在他種著作中曾將『盾形軟骨』譯爲『甲狀軟骨』。『錐狀軟骨』譯爲『斯塔爾軟骨』茲特附記於此。）

在氣管上部盡頭處，有一軟骨。其形略似指環。是爲『環形軟骨』。在『環形軟骨』之上方，有兩個『錐狀軟骨』對立。可以隨意轉動。其(A)(B)(C)三角卽爲轉動之樞紐。而『聲帶』之一端，亦卽繫在(A)角之上。在『環形軟骨』之前方，更有軟骨一大塊。其形頗似戰士手中所持之盾。是爲『

盾形軟骨』通常男子頸前有一突起之物。形似菓核。是即『盾形軟骨』之一部分。又此項軟骨之下方(D)係與『環形軟骨』相聯。茲再將『盾形軟骨』與『環形軟骨』之左側圖繪如下。

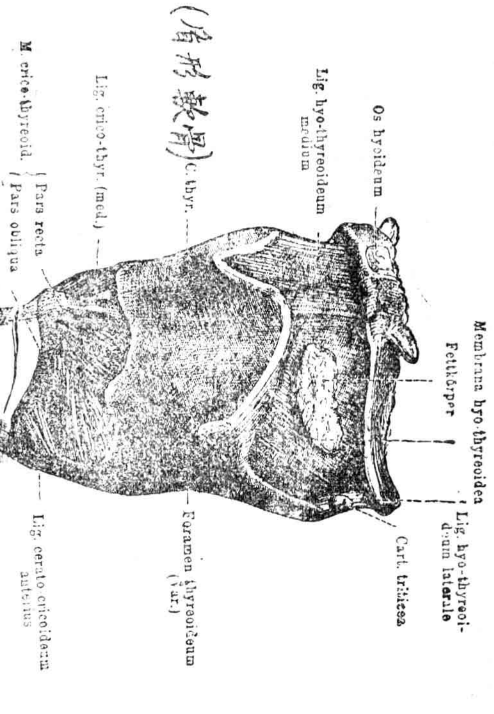
附圖八十二



在『盾形軟骨』及『環形軟骨』之間，爲各種筋肉所塡滿。如下列一圖。(按此圖

係從前左兩側觀之。

附圖八十三



現在我們再將『盾形軟骨』之左側一塊割去。以便看出其中各種筋肉之構造。圖中(子)(丑)(寅)(卯)(辰)(巳)等等筋肉，無不直接與『錐狀軟骨』有關。其作用卽在驅使該項軟骨活動自如。(請參看下列附圖八十四。)

附圖八十四

現在我們若從頸後觀去。（與上列附圖八十一之位置相同。）則『盾形軟骨』之後，『氣管』之上。忽然湧現一個形似『紹酒罈子』之物。此物非他。卽『錐狀軟骨』（按卽罈子上半節。）（與『環形軟骨』（按卽罈子下半節。）所共同組織而成者也。其中係用（丑）（寅）（卯）三種筋肉，把他捆成一個罈子之形。（請參看下列附圖八十五。）

附圖八十五

Epiglottis 蓋軟頭喉
Cornu sup.
C. Wrisb.
C. Sant.
M. aryt. transvers 寅
(丑) M. aryt. obliq
Cornu int.
Lig. cerato-cric.
C. cricoid (環形軟骨)
(卯) M. crico-aryt. post
Muskelhaltige Hinterwand der Trachea.
C. tracheales (氣管)

又上列附圖八十五中有『喉頭軟蓋』Kehldeckel 一種。據舊說所云。其作用在保護『喉頭』。換言之。飲食之時，則下垂以覆蓋『喉頭』。免爲食物所侵入。呼吸之時，則高高揭起。以便空氣出入。但此說在近來西洋生理學界中。又有人加以懷疑。漸趨動搖。

好了。現在我們應該研究『聲帶』了。究竟他藏在什麼地方？我們非把他找出來不可。下列附圖八十六，係將上列附圖八十五從左至右直截下去。成爲前後兩個半邊。附圖八十六中所表示者，即爲前面半邊而從頸後看去之狀。

圖中之5，卽爲『聲帶』計左右兩根，相對而立。其前端係繫在前面『盾形軟骨』之上。而後端則繫在後面『錐狀軟骨』之(A)角上。前後兩端扯緊。於是中間形成一個『縫口』爲『氣管』內空氣出入之要道。假如我們從高上看下去，彷彿是兩根帶子並立。所以叫做『聲帶』其實認眞講來頗與兩片嘴唇相似。不過不是上下相合，而是左右相合罷了。所以我們有時亦稱之爲『聲唇』Stimmlippe。

又上列附圖八十六中之4，爲『假聲帶』Falsche Stimmbänder。從上吊下來，與下方『聲帶』造成一個『囊形』。學者稱爲『盲囊』Blindsäcke 如上列附圖中之2，3是也。

附圖八十六

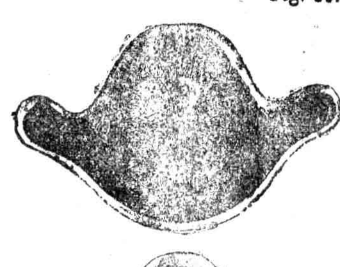
1
3
4
M. ary-epigl.
C. thyr.
2
M. thyreo-aryt. ext.
5
M. thyreo-aryt. voc.
C. cricoid.

假如我們用一個『檢喉鏡』如下列附圖八十七所示者。然則可以看見下面『聲帶』在呼吸之時。中間成一個長三角形之縫口。如下列附圖八十八所示。反之在發音之時則中間成

爲一個窄縫。如下列附圖八十九所示。至於縫口兩旁之兩條黑線，係『盲囊』入口之道。此外左右兩側，尚有兩個形如耳朵之深穴，則爲『食管』之一部。

附圖八十七

Fig. 89.



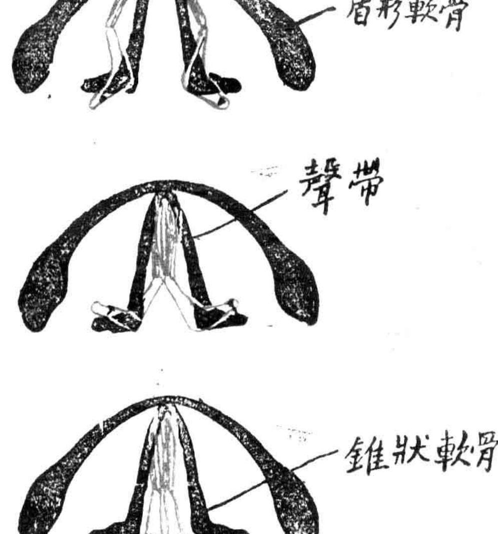
附圖八十八



附圖八十九

(四十三)聲帶活動時之各種形狀

我們在前節曾經說過『聲帶』後面兩端各自繫在左右兩個『錐狀軟骨』的(A)。角上面『錐狀軟骨』又因各種筋肉牽扯之故。轉動自由，從心所欲。下列附圖九十，附圖九十一，及附圖九十二。卽是表示『錐狀軟骨』活動時之情形。該圖係將『喉頭』橫截，成爲上下兩半節。（按此圖係下半節。）圖中外面弓形，係『盾形軟帶』之斷面。裏面下部那雙形似襪子之物，則爲『錐狀軟骨』之斷面。襪子上部兩條形似大腿之物，則爲『聲帶』之斷面。至於圖中紅色則係表示那雙『大腿』及『襪子』活動時之狀態也。



附圖九十

附圖九十一

附圖九十二

上列附圖九十中，係表示『錐狀軟骨』之(B)角。共向內邊斜着動來。其結果『聲帶』及『錐狀軟骨』之中間大開。是爲吾人將說話或唱歌以前之吸氣狀態。附圖九十一中，係表示『錐狀軟骨』之(B)角。分向外邊動去。其結果『聲帶』之中間合成一個縫口。而『錐狀軟骨』則成爲一個八字形。是爲吾人彼此細語時之活動狀態。附圖九十二中，係表示『錐狀軟骨』共向內邊對着動來。其結果『聲帶』及『錐狀軟骨』之中間，合成一個『縫口』。是爲吾人發出『胸聲』時之狀態。

假如吾人在靜止狀態呼吸自由之時。則『聲帶』及『錐狀軟骨』之狀態，有如上列三圖未動以前之兩條黑色腿襪。換言之。卽是形成一個長三角形是也。

(四十四)男女聲音高度之天然界限

在前面第三十二節內。曾言『彈簧』發音之高低，係由於空氣每秒鐘內衝撞次數之多寡。而空氣每秒鐘內衝撞次數之多寡，又以『彈簧』之短長厚薄爲轉移。我們人類的『聲帶』。既有類於『彈簧』。所以『聲帶』之短長，亦與音之高低極有關係。

通常男子『聲帶』長度約有西尺20 mm之譜。（約合中國長度六分五厘）女子『聲帶』長度則只有 15 mm 之譜。（約合中國長度四分九厘）故男子之音低而女子之音高。

至於兒童『聲帶』長度，約有 6 mm 以至於 8 mm 之譜。（約合中國長度二分以至於二分六厘）因而歌音亦高。並且兒童歌音範圍係逐年擴大。下列一圖即表示男女兒童自一歲起至十五歲止，其間歌音範圍逐年擴大之情形也。（按圖中音符，d係表示男童之音。音符 d，係表示女孩之音）

三十九圖 附

（年齡）Alter: 0 1·2 3·5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

照上圖看來。男女兒童之聲音高度，及其逐年擴大情形。彼此皆相差無幾。但是一朝春情發動。男童之喉頭，忽然變大聲帶亦復因而增長。自此以後，便不能再歌高音矣。女孩在此期間，喉頭亦稍有變動。但遠不如

男童變動之大。故女子雖長，而歌音尚能保持其幼時高度。茲再將男童女孩『變嗓』情形。圖繪如上。

附圖九十四

(右)　(左)

圖中左方直行，係表示尚未變嗓以前之歌音範圍。右方直行，則係表示變嗓以後之歌音範圍。我們由此可以看出男童變嗓以後歌音之降低，在一個『音級』Oktave 左右。而女孩則僅降低一個『長三階』Grosse Tery 左右而已。從此男低女高相差約有一個『音級』之多。西洋學者分別男女歌喉共有六種。一曰『最低音』Bass爲男子最低之音。二曰『次低音』Tenor 爲男子最高之音。三曰『中等低音』Bariton 亦爲男子之音。其高度介於上述(一)(二)兩種之間。四曰『次高音』Aet 爲女子最低之音。五曰『最高音』Soprau爲女子最高之音。六曰『中等高音』Mezzosoprans 亦爲女子之音。其高度介於上述(四)(五)兩種之間。茲再將每種歌喉所能歌唱之歌音範圍圖錄如下。

大約每人所能歌唱之歌音範圍。常在兩個『音級』左右。但是未經練習之歌喉。其歌音範圍較小。往往不到兩個『音級』。

又我們平常說話聲音，常較本人歌喉最低一個音，高出『四階』或『五階』之譜。譬如上列六種歌喉。其說話之音。Bass 當在 A 音左右。Bariton 當在 d 音左右。Tenor 當在 e 音左右。Alt 當在 a 音左右。mezzosopran 當在 d^1 音左右。Soprau 當在 e^1 音左右。

附圖九十五

Baß E—e'　Bariton G—g'　Tenor H—h'　Alt e—e''　Mezzosopran g—g''　Sopran h—h''

(四十五)歌音之高低强弱

在前節所述各人天賦之歌音範圍內。我們又可以隨意發出各種高低强弱不同之音。其方法計有下列三種。

(1)倘使『聲帶』之緊張程度逐漸增加。(按卽逐漸加緊之意)則聲音『高

度』亦隨之逐漸增高。反之。倘使『聲帶』之緊張程度逐漸減少。（按卽逐漸放鬆之意。）則聲音『高度』亦隨之逐漸降低。

（2）倘使肺部空氣向上鼓動『聲帶』之力，逐漸增加。則聲音『高度』亦隨之逐漸增高。反之。倘使肺部空氣向上鼓動『聲帶』之力，逐漸減少。則聲音『高度』亦隨之逐漸降低。

（3）倘使肺部空氣向上鼓動『聲帶』之力；逐漸增加。則聲音『强度』亦隨之逐漸增强。反之。倘使肺部空氣向上鼓動『聲帶』之力，逐漸減少，則聲音『强度』亦隨之逐漸變弱。

照（2）（3）兩項看來。肺部空氣鼓動之力，對於聲音之『高度』及『强度』，皆有極大影響。現在假若我們欲使某音之『高度』保持原狀不變。但將該音之『强度』增大。則事實上我們必須一方面將肺部空氣鼓動之力增加，以便聲音之『强度』由此增大。但他方面又宜使『聲帶』之緊張程度，爲相當之減少，以便產音較低，留一餘

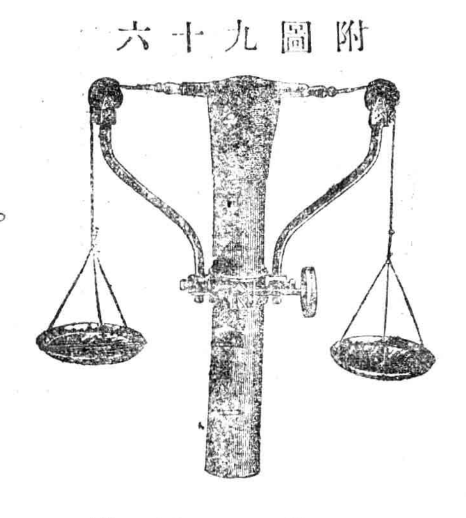
地，以待因空氣鼓動之力所增長的『高度』。其結果兩種作用互相調劑。該音之『高度』既能保持原狀不變，而該音之『强度』亦能隨意使其增大。

反之。假若我們欲使某音之『高度』保持原狀不變。但將該音之『强度』減小。則事實上我們必須一方面將肺部空氣鼓動之力減少。而他方面則宜將『聲帶』之緊張程度，爲相當之增加。然後兩種作用始能互相調劑。由此所產之音乃恰如吾人理想中所要求之『高度』與『强度』。

關於『聲帶』顫動之實驗。西洋學者常在死尸喉頭氣管之下。用一『空氣壓力器』。以鼓動喉頭『聲帶』。由此以知空氣壓力之大小。與聲音『高度』及『强度』之關係。同時又將『聲帶』前端（按即接近『盾形軟骨』之處）用一砝碼墜其下。以驗緊張程度之大小。由此以知『聲帶』緊張之大小與聲音『高度』之關係。

此外更有人用玻璃管一。其上套以橡皮帶子。並於橡皮帶子之左右兩側，各用一個夾子扯緊。使此圓形橡皮帶子，成爲一個『縫口』之狀。如下列附圖九十六所示

者。然而且兩個夾子之下，皆墜以秤盤砝碼。以驗緊張程度之大小。然後再在玻璃管之下，用一『空氣壓力器』以鼓動上頭橡皮帶子之『縫口』。以驗空氣壓力之大小。由此方法亦足以證明喉頭發音之理。



附圖九十六

（四十六）胸聲與頭聲

大凡未經訓練之歌喉。若使之歌唱。而且發音次序，係從彼所能唱之最低一音起，以至於彼所能唱之最高一音止。我們從此可以發現其中低音一部分與高音一部分之『音質』，完全兩樣，我們稱呼前者（即低音一部。）爲『胸聲』Bruststimme。後者（即高音一部。）爲『頭聲』Falsettstimme。假如我們利用『檢喉鏡』以觀之。則『胸聲』發音之時。其『聲帶』好像兩片『厚』唇之狀。時而分向左右兩側動去時而又共向中間閉來。西洋學者因稱之

爲『對擊彈簧』下面附圖九十七卽是形容此種『對擊』之狀。

附圖九十七

上列附圖九十七中部左右兩方各設一個棉質之物。物內裝以螺旋之絲，可以左右伸縮。然後再於下面引入空氣以鼓動之。其結果空氣往上逼去時，則兩物分向左右而動。空氣上逼之力減去，則兩物又共向中間閉合。

至於『頭聲』發音之時。則其『聲帶』好像兩片『薄』唇之狀。其顫動情形，則與上面附圖九十六中所示者相同。而且兩唇永無緊緊閉住之時。此則頗與上述『胸聲』相異者也。

我們人類聲音。在天然方面雖有『胸聲』及『頭聲』之別。但善歌者必須避免此種缺陷。勿使『音質』成爲兩樣。

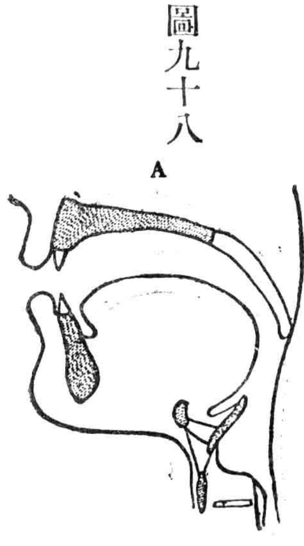
惟德國歌唱藝術，最重『表情』。憂愁之時則常帶沉鬱之音。歡樂之時則又改

作朗爽之音。換言之。常使『頭部各處空隙』（按卽我們歌音之『響板』如口腔鼻腔咽腔之類。）之狀態，時時變換。以作成此種沉鬱或朗爽之『腔色』。但『音質』則始終不變。至於意大利歌唱藝術則並此『腔色』之變換，亦復捐棄。（至少亦捐棄一部分）以便始終保持其同一之『腔色』與『音質』。

（四十七）母音

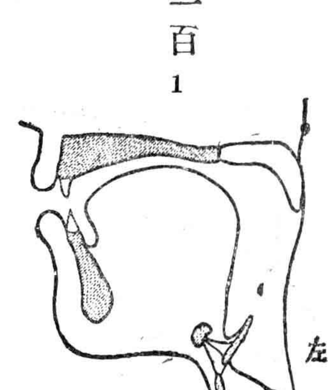
我們在前面第四十六節內。曾言我們頭部各處空隙，常有影響於『腔色』換言之。頭部各處空隙，（如口腔，咽腔，鼻腔，之類。）如有變動，則『腔色』亦隨之變動。下面所列三個圖形，卽係表示發A,U,I各種「母音」時。所呈現之口腔，咽腔等等狀態也。

附圖九十八



附圖九十九

附圖一百 1



關於『母音』學說種類甚多。其最重要者有二種。茲請分述如下。

第一說，以爲『母音』係喉頭所發『基音』以及各種『高音』（按卽前面第二十八節所謂『高音』。）所混合而成。口腔等處則僅爲其『響板』，如『大風琴』中『彈簧』上之『漏斗』作用是也。

第二說，則以爲口腔等處，有如『大風琴』中之『風管』作用。換言之。口腔因受喉頭空氣之吹，獨立成聲。此聲卽爲構成『母音』之特殊原素。

（四十八）耳之構造

我們人類之耳朵可以分爲三個部分。一曰『外耳』二曰『中耳』三曰『內耳』，下列附圖一百零一中之D，是爲『外耳』係入口之處至『耳鼓』Paukenfell（按卽圖中之ee）爲止。圖中之BB，以及BE，是爲『中耳』圖中之A，是爲『內耳』。

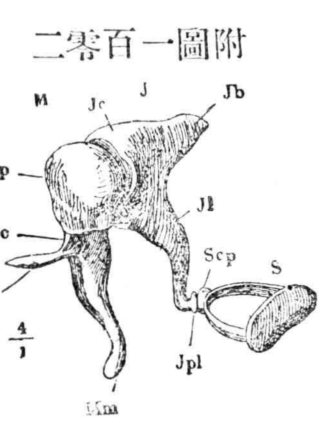
附圖一百零一

『耳鼓』係一種圓形薄膜，張在『外耳』及『中耳』之間。將兩方完全隔斷。是爲吾人接受外界音波之處。

『中耳』係由『鼓室』Paukenhöhle，及『喇叭』Eustachische Trompete所組成。前者爲傳遞『外耳』音波以入『內耳』之郵差。後者與吾人之『鼻咽腔』Nasenrachenraum相連，因而『中耳』得以通空氣。

在『鼓室』之中復繫着一種『聽骨』Gehörknöchelchen。如下列附圖一百零二。

附圖一百零二



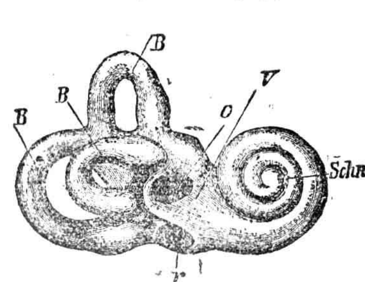
此種『聽骨』係由『鼓槌』Hammer,『鐵砧』Ambos『鞍鐙』Steigbügel 三種所組成。上面圖中,M為『鼓槌』Mcp 為槌首,Mm 為槌柄。J 為『鐵砧』Jc 為砧身,Je為砧之長枝。S為『鞍鐙』

『鼓槌』之柄 Mm 直接與『耳鼓』之薄膜相連。『鞍鐙』之底面則與『內耳』之『卵形窗』Ovales Fenster 相接。而『鐵砧』則負聯絡『鼓槌』及『鞍鐙』之責。

『內耳』一名『螺堂』Labyrinth。在吾人『頭蓋骨』Schädelknochen之內。外衣係用薄膜製成。而內部則實以水液。學者稱為『螺堂液』Labyrinthwasser。茲將『螺堂』形式,圖繪如下。

『螺堂』係由『弓形管』Bogengänge『前庭』Vorhof，『螺形管』Schnecke三種所組成。圖中符號。BBB係表示三根『弓形管』。V係表示『前庭』。(前庭之中有洞口二個。在上方者稱爲『卵形窗』。其符號爲O在下方者稱爲『圓形窗』Rundes Feuster其符號爲r)Schn係表示『螺形管』。

附圖一百零三



據近代生理學者之研究。『弓形管』與『前庭』中所含之神經Nervenendigungen及官能Sinnesorgane。其作用在使吾人能感覺頭部之各種地位與各種動作。至於『螺形管』之作用，則專司聽覺之職。因此我們對於『螺形管』一物應當施以特別研究。

『螺形管』之『始端，』係發自『前庭』之內。其後漸作螺形，盤至中心而止。是爲『終端』。在該管之中復有兩種薄膜，一種嫩骨。將該管隔成三根管子。假如我們將

該管橫切一刀。(如切『香腸』一樣。)則其斷面有如下圖。

圖中Ls爲『螺旋嫩骨』Lamina Spiralis。B 爲『基礎薄膜』Basilarmembran，係與『螺旋嫩骨』相接，成爲一根直線，將該管平分爲二。其上爲『前庭螺溝』Scala Vestibuli。(按卽圖中之Sv。又『螺溝』本應譯作『螺梯。』惟『溝』字含義較顯，故譯爲『螺溝』。)其下爲『鼓室螺溝』Scalatympani。按卽圖中之St。)

附圖一百零四

在『前庭螺溝』之中，又有一種薄膜，名叫『賴斯蘭薄膜』Reissnersche Membrau的。(按卽圖中之R。)另自隔出一條小溝來。我們暫且稱他爲『小螺溝』Ductus Cochlearis。(按卽圖中之Dc。)

上面所謂『螺旋嫩骨，』『基礎薄膜，』『賴斯蘭薄膜，』之分配位置，係從該管『始

端』起一直到『終端』止。全管之中皆如是分配。換言之此種『嫩骨』及『薄膜』之長度，係與『螺形管』之長度相終始。因而管中『前庭螺溝』『鼓室螺溝』『小螺溝』三種，亦自該管『始端』起至『終端』止，彼此完全隔絕一直到了『終端』之處，然後彼此方才會合相通。又三溝之中皆有水液在內。

因爲三溝皆隨着該管作螺形之狀，盤旋而上。所以我們稱他爲『螺溝』至於『嫩骨』與『薄膜』，當然亦在管中形成螺旋之狀。有如『螺梯』一樣。

『前庭螺溝』之『始端』係在『前庭』之中，而與『卵形窗』相對。『鼓室螺溝』之『始端』則爲薄膜所隔不與『前庭』相通，而與『圓形窗』相對。

在『基礎薄膜』之上。（『小螺溝』方面。）有一種『柯第官能』Cortische Organ，係由聽覺細胞及神經所組成。與吾人之腦相通。是爲『內耳』中最重要之部分。

（四十九）聽之原理

當其耳外音波衝到（按卽耳外空氣所起之『濃密作用』）。吾人『耳鼓』之時。

『耳鼓』之膜，乃向內方拱去。因而連在該膜上面之『槌柄』，不得不跟着往內動去。其結果『鼓槌』之體成一斜形，『柄』向內而『首』向外。同時『鐵砧』因受『槌首』之牽累，隨着向外傾斜，又將『鞍鐙』引動。本來『鞍鐙』之底係與『內耳』之『卵形窗』相接。此時受其引動，向着窗內一按。於是窗內『前庭螺溝』之水，受其掀動，向着『賴斯蘭薄膜』壓去。因此之故，『小螺溝』及『鼓室螺溝』之水，莫不次第受其影響，往下動去。其結果竟將『圓形窗』上之膜逼得來往外拱出。

倘若耳外音波，復將『濃密作用』改爲『稀薄作用』，則『耳鼓』亦當然受其吸引，向着外方拱去。其結果所有上段描寫之顫動方向，亦無不掉轉頭來，跟着動回。換言之。從前『槌柄』之向着內方動來者，現在則改向外方動回去，從前『鞍鐙』之向着『卵形窗』按去者，現在則改向窗外退回。因而三溝之水亦無不掉頭動回。

總而言之。耳外音波若在一秒鐘之內，共起『濃密作用』與『稀薄作用』各一百次。則耳內各種動作亦復一來一往，各一百次。

我們知道，『小螺溝』與『鼓室螺溝』之間係由『基礎薄膜』所隔斷。該膜之上復有『柯第官能』，包含聽覺細胞及神經，與吾人之腦相通。那麼當其『小螺溝』及『鼓室螺溝』之水，上下活動之時。其中『基礎薄膜』及其附帶之『柯第官能』亦當然隨之上下往來顫動。

但是現在我們又問。當其『基礎薄膜』上下往來顫動時。究竟只限於該膜『始端』一部分嗎？抑係全膜（從『始端』起至『終端』止。）皆在顫動嗎？抑或每依音之高度，時而在該膜此處顫動，時而復在該膜彼處顫動嗎？關於這個問題，至今未有一個切實答案。據德國著名物理學者 Helmholtz 之研究。則謂『基礎薄膜』之纖維質，恰如無數絲絃依次排立。其一端繫在『螺形嫩骨』之上。其他一端則繫在對面『螺形管』之壁上。每絃各具一音。一旦耳外某音傳入耳來。則該膜某絃因『同聲相應』之故。立即陷於顫動。換言之。該膜顫動常依耳外傳來之音節高低而定。一時在此部分。一時又在那部分。至於 Helmholtz 之所以有此假設者。係以『基礎薄膜』之緊張

程度為橫緊而縱鬆。（按『橫』字係指該膜自『嫩骨』至『管壁』之寬度而言『縱』字係指該膜自『始端』至『終端』之長度而言）在物理學上，倘有一根薄膜橫面扣緊而縱面放鬆。則與無數絲絃排立相似。

又『基礎薄膜』之『始端』寬度甚窄。其後逐漸擴大到了『終端』一頭，竟較前擴至十二倍之多。因此之故。接近『始端』者其音高。接近『終端』者其音低。

耳外所來之音，如係一種『單音波』。則『基礎薄膜』之某絃，當照『同聲相應』之原理，陷於顫動。並由該處『聽覺神經』傳入吾人腦中，吾人乃有某音之感覺。已如上述。但是假如耳外所來之音，是一種『複音波』。（按卽由各種『單音波』所混合而成者。）則其現象又當如何？據生理學者考察。當其『複音波』初到『耳鼓』以及『中耳』之際，尚保持其混合狀態。及至『內耳』之時，乃起分析作用，將他依然化為若干『單音波』。每一個『單音波』，各由膜上相當之絃與之作『同聲相應』。由此所生之各個單獨『音覺』Tonreiz，各自遵着他的『神經軌道』傳入吾人腦中。此時又

因吾人心理作用之關係，將他依然混合起來成爲一種『複音波』之感覺。

(五十)聽之能力

假如我們『內耳』中的『基礎薄膜』果如上面所說，係由無數絲絃排立而成，有如『鋼琴』一樣。那麼絲絃之數當然亦有一定限度。對於耳外所有之音其勢不能一一接收，與之共起『同聲相應』作用。換言之，我們聽之能力亦當然有個限度。

通常我們所能聽出之音。其最低限度，約在每秒鐘十六次『複顫動』左右。再低則不能聽出矣。最高限度，約在每秒鐘二萬次『複顫動』左右。再高亦不能聽出矣。在此十六次至二萬次之範圍內。又常因各人之衰老少壯，疾病健康，以及對於聽覺之有無訓練。（譬如音樂家與尋常人。其聽覺當然略有差異，）又發生若干之差異狀態。

但是我們耳外之音，事實上並不是僅僅限於十六次至二萬次之一部分。若專就其高音限度一方面而論。則往往超過九萬次『複顫動』以上。（當然係用物理測

驗而得。）其範圍之大實非吾人生理上聽之能力所可及也。因此之故假如我們將生理上所能聽出之音，與物理上所能發出之音。畫爲兩線，對照比較一下。則知生理上所能聽出者，僅係物理上所發出者之一部分。而且該部分之位置，約與物理上低音方面一部分之位置相等。

又物理上對於兩音間之差別，極爲細密。而生理上則否。譬如有兩音於玆，其彼此相差之程度，僅僅半次顫動或四分之一次顫動。（指中部音級而言。不是過低或過高之音級。）凡曾經練習之耳朶，尙能辨出其孰高孰低。若其差異程度再小，則不復能辨別矣。但在物理上則兩音之差異程度，雖小至十分之一次顫動，或百分之一次顫動。尙能分辨出來。是又生理上聽之能力不及物理上細緻之一證也。至於未經練習之耳朶，則有時兩音之差異程度，雖至許多顫動次數之大。而聽者仍往往茫然不能辨別其孰高孰低也。

以上所謂辨別兩音高度之差異。其法係先發一音之後，立刻再行另發一音。然

後使聽者將其比較。故尙不十分困難。若我們同時發出兩音，其差異程度如未超過十次至二十次顫動以上。（指中部音級而言非指過低或過高之音級而言）則雖曾經練習之耳朶有時尙不能辨出，而誤以爲兩音高度相同也。

（五十二）音之高湧

假如我們同時發出甲乙高低兩音。但其高低相差之程度，極爲微小。因而甲乙兩音傳在耳內『基礎薄膜』之上，彼此地位亦相距極近。而且接近之處，往往常爲甲乙兩音勢力所同及。造成一種『公有地帶』，實行『共同顫動』。至於隣近『公有地帶』之兩旁地帶，則仍是各自分別顫動。換言之。『公有地帶』之外旁地帶，（按指接近『始端』這方面）則單獨與甲高音響應。『公有地帶』之內旁地帶，（按指接近『終端』那方面。）則單獨與乙低音響應。而『公有地帶』自身，則作甲乙高低兩音之共同響應。總而言之。現在『基礎薄膜』上之顫動部分可以析爲三條地帶。

現在我們假定甲音在每秒鐘內顫動六十次。（例如下列圖中之B。）乙音較

低，在每秒鐘內只顫動五十次。（例如下列圖中之A）。倘若甲乙兩音彼此合作，則造成一種『複和波』（例如下列圖中之C）。

附圖一百零五

A

B

C

上列附圖一百零五中。C之顫動地方，當在『公有地帶』之上。A之顫動地方，當在『公有地帶』之內旁地帶上。B之顫動地方，當在『公有地帶』之外旁地帶上。

我們細將上列圖中之AB兩行，一為比較。則知A行中每五個音波，與B行中每六個音波，恰巧遇在一處。（按上列圖中有※符號之處卽是）。因此之故，該處『複音波』之凸凹形勢，亦特較他處為高深。（請參看上編第十七節便知）。換言之。該處『動程』特較其他各

處爲大。其結果該處所成之音，亦特較其他各處爲强。

若照上面甲乙顫動數之假定。則甲音與乙音在每秒鐘之內如是巧遇者，當有十次。那麼我們在每秒鐘之內覺得該音忽然特別加强者，亦當有十次。彷彿海內波濤十度『高湧』一樣。西洋學者稱呼此種『高湧』爲 Schwebungen。

現在我們再查『高湧』次數，究與甲乙兩音顫動次數有何關係。其結果我們發現『高湧』次數，恰爲甲乙兩音『顫動數』之差。譬如上例則爲 60—50=10 是也。因此之故。我們若欲求得任何兩音之『高湧』次數。但將該兩音中之低音『顫動數』從高音『顫動數』中減去。其所求得之差數，卽爲每秒鐘內之『高湧』次數也。

在西洋音樂界中。往往利用一種『定音叉』（其『顫動數』已知）以求其他一音之『顫動數』。譬如這根『定音叉』之『顫動數』爲五十。而另有其音則不知其『顫動數』。現在我們使此叉與某音同時發聲，而在旁細數其『高湧』次數。究竟每秒鐘內共有若干。假若共有十二次，則我們或將此數加在五十之上，成爲六十二（如

『定音叉』之音係低於某音。或將此數從五十之中減去，成爲三十八。（如『定音叉』之音係高於某音。）此六十二或三十八，卽爲某音之『顫動數』是也

又兩音之間，每秒鐘內之『高湧』次數愈少，則愈覺適耳。反之『高湧』次數愈多，則愈覺刺耳。但次數過多，超越一定界限，則又不覺得刺耳矣。

因爲高音級與低音級之『顫動數』，彼此大小不同之故。所以刺耳程度亦復彼此不一。大約在C之一個音級中，如兩音高低相差之數在40以內。（其音程約爲『最長五階』Ubermässige Quinte左右。譬如C—Gis）。則尚覺其刺耳。若超過40以外，則不復刺耳矣。此外在c之一個音級中，如兩音高低相差之數在60以內。（其音程約爲『純五階』Reine Quinte左右。譬如G—g）。在c¹之一個音級中如兩音高低相差之數在100以內。（其音程約爲『最長四階』Ubermässige Quarte左右。譬如c¹—fis¹。）則尚覺其刺耳。若超過此數，則又不覺其刺耳矣。總之刺耳限度各自不同。音級愈高，則兩音相差之數愈爲擴大。（如40，60，100，逐漸擴大之類）反之

音級愈高而『音程』則愈爲縮小。(如『最長五階』,『純五階』,『最長四階』 各種音程次第縮小之類。)

又此種『高湧』現象不但在兩個『基音』中見之。卽在兩個『高音』中亦常具有此種現象。換言之。假如我們同時發出 C_1 G_1 兩音。其『高湧』次數在每秒鐘之內應爲 16。但同時C_1之『第一高音』C,與G_1之『第一高音』G,亦復造成『高湧』現象,而其次數則應爲 32。因C與G之『顫動數』常倍於C_1與G_1之『顫動數』。故其所成之『高湧』次數亦應照例加倍也。(請參看上編第二十八節)

(五十二)連合音

設有甲乙高低兩音於此。其『顫動數』之差,在每秒鐘內若達30以上。則除甲乙兩個音之外,我們還可以聽見一個丙音,其『顫動數』恰爲甲乙兩音『顫動數』之差。譬如我們假定甲音爲 260。乙音爲 200。則丙音應爲260—200=60是也。學者稱呼這個丙音爲『相差音』Differnztöne。以其爲甲乙兩音相減之差數也。

除了丙音之外，有時還可以聽出一個丁音。其『顫動數』恰爲甲乙兩音『顫動數』之和。換言之，卽爲 260+200=460 是也。學者稱之爲『相加音』Summationstöne，以其爲甲乙兩音相加之和也。但『相加音』之聲遠較『相差音』爲弱，不易聽出。所以在物理學界中之知有『相加音』，亦遠較『相差音』爲晚。（又『相加音』對於甲乙兩音大都不甚諧和。正因其不易聽出之故，對於音樂却狠有益。）

『相差音』與『相加音』總稱爲『連合音』Kombinationstöne。而甲乙兩音則稱爲此項『連合音』之『主音』Primärtöne。但事實上『連合音』之種類並不限於上述之丙與丁兩個。此外還有其他戊己庚辛……等等。因爲由甲乙兩音產出丙丁兩音之後，於是甲乙丙丁相互之間，又可造成戊己庚辛……等等『連合音』。茲舉其最重要者數種如下。（按下列表中符號，係以 h 代甲，以 t 代乙。h 音常較 t 音爲高。）

（丙）　h−t

（丁）　h+t

(戊)　2t—h

(己)　2h—t

(庚)　3t—2h

(辛)　3h—2t

(壬)　4t—3h

(癸)　4h—3t

在上列八個『連合音』之中。以丙戊兩音較强，容易聽出。假如甲乙兩音之距離，超過『短三階』以外。則其『連合音』只有丙戊二種存在。其餘各種悉歸消滅。倘若甲乙距離超過『長六階』以外。則其『連合音』只有丙種。倘若甲乙距離爲 1：12 之比。則各種『連合音』皆歸烏有矣。

假如甲乙兩音倘具有各種『高音』Obertöne 在內。則此項『高音』當然亦能產出各種『連合音』。而且其中一部分每與上述各種『連合音』之構造相同。

關於此種『連合音』之來源，可以分爲兩種。一爲物理的。一爲生理的。前者譬如甲乙兩個『主音』與其『連合音』，係同時由樂器之上，傳入附近空氣。換言之，未到吾人兩耳以前，卽已實際存在者也。學者稱之爲『物理的連合音』Physikalische Kombinationstöne。後者譬如甲乙兩個『主音』既發之後。吾人應用各種精密物理器械實驗，皆不能證明『連合音』之已存在。惟用吾人雙耳去聽，則主觀方面却有一種『連合音』之存在。因此之故。西洋學者乃揣測此種『連合音』之成立地點，應在『耳鼓』之上，非成於耳外者也。學者因稱之爲『生理的連合音』Physiologische Kombinationstöne。

此外從前西洋學者常以『相差音』之『顫動數』，恰與『高湧』次數相等。（按『高湧』次數亦爲h—to）遂疑『相差音』之成立係由於『高湧』之結果。但此說近已爲人駁倒，故不復再述。

（五十三）音色

所謂『音色』Tonfarbe者，卽吾人心理上對於一個『單純聲音』所起之各種印象也。其最重要者有三。一曰清濁。二曰大小。三曰軟硬。

（甲）清濁。　我們對於較低之音，常覺其黑暗沉鬱，因而聯想及於雷聲。又由雷聲聯想及於暴風急雨，黑地昏天。有時又覺低音之來，常與憂愁相伴。恍如柩車前行，親朋掩淚，一片凄涼，毫無生氣。總之其色暗而其聲濁，此較低之音所含之特徵也。反之。我們對於較高之音，又常覺其光明清朗，因而聯想及於朝曦。又由朝曦聯想及於鳥聲宛轉，春色宜人。總之其色朗而其聲清，此較高之音所含之特徵也。

（乙）大小。　我們對於較低之音，常覺其大而且重，因之聯想及於房屋基礎，平穩寬大，爲上面一切建築物所依託。同時又因產出低音之樂器，其體較大，所以音波

傳到吾人身邊之際，好像把我們前後左右皆包圍着。（凡曾經訓練之聾啞者，皆能用『觸覺』Tastsinu 知之。）總之，較低之音，常令吾人發生龐大無比之感。

反之，我們對於較高之音，又常覺其小而且輕，因之聯想及於樓頭椽桷，輕巧玲瓏，飄懸空際之中。同時又因產出高音的樂器，類多窄小。因而音波傳入吾人身畔之際，僅由耳內接待。非若低音之包圍全身，能使吾人『觸覺』直接發生影響。總之較高之音，常有一種輕細高飛之態。

（丙）軟硬。　假如我們有一個較低之音，與一個較高之音。使之先後發出。而且在物理上之『强度』，彼此完全相同。但在吾人感覺方面，總覺得較低之音來得溫軟。而較高之音則來得堅硬，有時竟如一根極尖之針，刺入吾人耳內一樣。

以上所述清濁，大小，軟硬，三種。皆為一個『單純聲音』在吾人心理上所引起之印象。學者稱為『音色』。至於普通樂器上所產之音，則多非『單純聲音』，（按即由一種『音波』所構成之『單音波』。）而為『混合聲音』。（按即由各種『音波』所混合

而成之『複音波。』)因此之故。我們若欲精密考察『單純聲音』之色。必須利用各種物理儀器，先將『混合聲音』一一析成『單純聲音。』然後再行仔細考察其色。方爲正當。

(五十四)混合音色

假如我吹笛子你彈琴。彼此所奏之音，其高低雖完全相同。而音色却判然有別。倘隔室之人聞之。雖不必目覩吹奏，亦恆能辨出孰爲笛上之音。孰爲琴上之音。此無他。因各種樂器所具之『混合音色。』各不相同故也。

我們知道。普通樂器上所發之音多係『基音』與其『高音』混合而成。(請參看上編第二十八節。) 換言之。在名義上我們雖只稱他爲一個音。而在實際上則係無數『分音』所集成。每一個『分音』既皆各具一個特別『音色』。(已如上面第五十三節所述。) 現在若將諸種『音色』彙集起來，則其結果又當成爲一個『混合音色』Klangfarbe。

各種樂器之『分音』，其多少强弱次序，既各有不同，因而各種樂器之『混合音色』亦復彼此互異，舉其著者如下。

（甲）假如該器所發之音，只是一個『基音』，而無其他各種『高音』雜於其中。或者該項『高音』極爲微弱，無甚影響，（如『定音叉』之類。）則其聲音甚爲溫軟（但音級過高者則爲例外。）

（乙）假如該器所發之音。除『基音』外，尚雜有（II）（III）（IV）（V）（VI）各種『分音』在內。（如鋼琴等等。）則其聲音甚爲豐滿。

（丙）假如該器所發之音其『分音』數目在（VI）（VII）等等以上，猶能聽出者。（如提琴之類。）則其聲音甚爲尖銳。

（丁）假如該器所發之音其中『分音』次序，若爲（I）（III）（V）（VII）等等奇數者。（如洋簫之類。）則其聲音甚爲空洞。（但『基音』强度若遠過其他各種『高音』則此弊可免。）

總而言之。各種樂器聲音之所以彼此不同者，係由於其中所含『分音』次序，以及『分音』多少強弱之相異。同時各種『分音』之中，又各自具有一種特別『音色』由此以造成一種『混合音色』。換言之，在物理方面與心理方面，皆有其重要原因者也。

此外各種演奏方法之不同（如口吹手彈之類）以及各種製造材料之相異等等，對於各種樂器之聲音，亦常有重大影響。

（五十五）協和音階與不協和音階

『協和音階』Konsonanz 者，卽兩個聲音互相協和之意也。『不協和音階』Dissonanz 者，卽兩個聲音不相協和之意也。此種音階分別，在音樂上極佔重要位置。我們應該加以特別注意。

關於『協和音階』與『不協和音階』之學說，分新舊兩種。舊者係從物理方面着眼。如德國物理學家 Helmholtz 之類，是也。新者係從心理方面着眼。如德國心理學

家Stumpf之類是也。茲分述其說如下。

（I）舊說以爲『協和音階』與『不協和音階』之分別。係以該兩音之各種『高音』Obertöne，是否多數相同爲準。換言之。卽彼此『高音』相同之數愈多，則協和之程度愈大。反之。若彼此『高音』相同之數愈少。則其勢此種相異之『高音』，必將釀成許多『高湧』現象，以刺吾人之耳。因而引起不相協和之感。

譬如『協和音階』其最重要者，爲下列八種。

(子)　初階Prime　　1：1

(丑)純八階Oktave　　1：2

(寅)純五階Quinte　　2：3

(卯)純四階Quarte　　3：4

(辰)長六階Gr,Sexte　　3：5

(巳)長三階Gr.Terz　　4：5

(午)短三階 Kl,Terz　　5:6

(未)短六階 Kl,Sexte　　5:8

現在我們假定有甲乙兩音。甲之『顫動數』爲1。乙之『顫動數』亦爲1。換言之。甲乙兩音之高度，完全相等。是卽上述之(子)項。然後我們再將甲乙兩音之『高音』次序，及其『顫動數』一爲考查如下。

(子)初階							
甲	※	1	2	3	4	5	6
乙	※	1	2	3	4	5	6

上列表中有※符號者是爲『基音』之『顫動數』。此外則皆係『高音』之『顫動數』。(以下各表符號皆倣此) 我們細看上表。則知甲乙兩音之『基音』及『高音，』其『顫動數』係彼此全同。最爲協和。所以『初階』遂居『協和音階』中之第一把交椅。

其次我們再假定甲音之『顫動數』為1。乙音之『顫動數』為2。換言之乙音較甲音高一個『音級』。（按卽『純八階』）是卽上述之（丑）項。我們再將甲乙兩音之『高音』次序，及其『顫動數』一為考查如下。

（丑）純八階						
甲	1	2	3	4	5	6
乙		2		4		6

我們細看上表。只有2,4,6三種相同。而且甲乙相同之處，係從甲音之第二位（2）開始。所以『純八階』的協和程度，便差於『初階』一等。遂坐第二把交椅。

現在再將（寅）（卯）等項一一如法泡製，以比較之。則其式如下。（下列表中乙音常高於甲音。譬如以甲音之『顫動數』為2，以乙音之『顫動數』為3之類。）

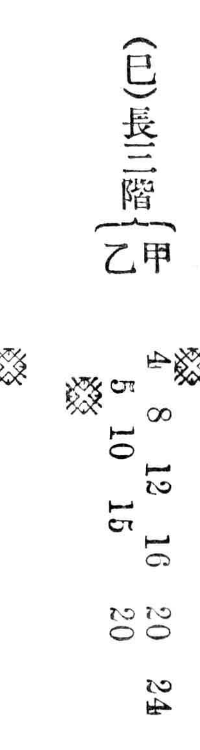
（寅）純五階						
甲	2	4	6	8	10	12
乙	3		6	9		12

(卯)純四階
甲 ※ 3 6 9 12 15 18
乙 ※ 4 8 12 16

(辰)長六階
甲 ※ 3 6 9 12 15 16
乙 ※ 5 10 15



(巳)長三階
甲 ※ 4 8 12 16 20 24
乙 ※ 5 10 15 20



(午)短三階
甲 ※ 5 10 15 20 25 30
乙 ※ 6 12 18 24 30

(未)短六階

甲	5	10	15	20	25	30	35	40
乙	8	16	24	32	40			

現在我們可以看出上列各表中甲乙兩音相同之數，以及開始相同之處。無不愈趨愈下。（惟辰巳兩項略同。）譬如(寅)項係從甲音第三位起開始相同。其相同之數只有6,12兩種。(卯)項係從甲音第四位起。其相同之數只有12一種。(辰)項係從甲音第五位起。其相同之數只有15一種。(巳)項係從甲音第五位起。其相同之數只有20一種。(午)項係從甲音第六位起。其相同之數只有30一種。(未)項係從甲音第八位起。其相同之數只有40一種。

誠然甲乙所有之『高音』數目，原不止此。我們尚可推起下去，再得若干。但『高音』之次序愈高，則其發聲愈微，影響較少。因此之故。我們只須推至六種以至于八種已足。不必往下再推。

在上列各種『協和音階』中。從前西洋學者常按照他們的協和程度，分爲四個階級如下。

(元)『絕對協和音階』Absolute Konsonanzen。上列(子)(丑)兩項屬之。

(亨)『完全協和音階』Vollkommene Konsonanzen。上列(寅)(卯)兩項屬之。

(利)『中等協和音階』Mittere Konsonanzen。上列(辰)(巳)兩項屬之。

(貞)『不完全協和音階』Unvollkommene Konsonanzen。上列(午)(未)兩項屬之。

其結果我們可以得出一個斷案。假如甲乙兩音相同之點，近而且多（指開始相同之處與彼此相同之數而言）則合作之程度愈大。因而協和之程度亦愈大，反之。倘甲乙兩音相同之點，遠而且少。則合作之程度愈小，更加以許多『高湧』Schwebungen 現象雜於其中。（按此種『高湧』之現象，係由其中不合作之『高音』相互產出者）因而協和之程度亦愈小。

由這種斷案又產生一種結論。即是『協和音階』既以『高音』之『高湧』現象爲轉移、那麼。假如甲乙兩音係同時而鳴。我們立即可以感着『高湧』之象。所以對於該兩音之協和程度，最易辨出。反之，假如甲乙兩音係先後而鳴。則『高湧』之象不易發現。因爲我們必須將那到耳較早之音，(按其時該音尚在記憶之中。猶未完全忘去)。與這入耳較後之音，拿來比較。究竟其中『高音』彼此有無相同之點？然後我們始能斷定其協和程度。但此時既須乞靈於記憶之力。所以終不若甲乙兩音同時而鳴之易於辨出其協和程度也。

以上所言，皆係『協和音階』。至於『不協和音階』亦係應用此理推斷。譬如『一長二階』Gr, Sekunde 爲 8:9 之比。現在我們依照前法，以比較其『高音』之次序如下。

長二階 甲	※ 8	16	24	32	40	48	56	64	72
長二階 乙	※ 9	18	27	36	45	54	63	72	

我們細看上表便知甲乙兩音相同之處，係自甲音第九位起。其相同之數，則只有72一種。更遠不如上列(未)項，宜乎屏諸『協和音階』之外矣。

(II)新說則以爲兩音之『協和』與否，全係心理上之現象。實與物理上之『高音』，以及生理上之『高湧』無關。茲略舉數例如下。

第一。設有甲乙兩音於此。其關係爲『協和音階』。現在我們倘若使之先後而鳴。復同時設法將其『高音』一齊避去。則其結果甲乙兩音依然保存其『協和』之特質。初不因其缺乏『高音合作』之故，喪失其協和資格。

第二。設有甲乙兩個『定音叉』於此。甲之『顫動數』爲620。乙之『顫動數』爲775。恰恰構成一個『長三階』。(按『長三階』爲『協和音階』。)現在我們若將甲乙

兩叉一齊放在左耳之外。使其同時發聲。則甲乙兩音互相協和，但有『高湧』現象雜於其中。反之。倘若我們改將甲乙兩叉分置左右兩耳之外。使其同時發聲。則甲乙兩音仍然互相協和，但是却無『高湧』現象雜於其中。換言之。『高湧』現象之有無與『協和』程度無關。

第三。『高湧』現象係隨『音級』之高低而異。（請參觀前面第五十一節。）而音階之『協和』與否，則不隨『音級』高低而變遷。換言之。低音級之C—G，與高音級之C^3—C^3，皆為『純五階』其協和程度固彼此相等，初不以『音級』高低而異也。

第四。我們辨別兩音是否『協和』。實際上每覺得先後發聲，易於判斷。而同時發聲，反難於估定。故舊說以為先後而鳴，須憑記憶之力，始能辨別，不若同時而鳴之易於判斷者。誤也。蓋前一個音雖略較後一個音先到腦中，但在心理現象上，該項先到之音，仍是活潑潑的存在。一俟後一個音到來，立即與之共起『融合作用』，而判定其是否協和。實際上毫無困難之感。

總之。兩音之是否『協和。』完全屬於心理現象。當其兩音初到腦時，立即發生一種『融合作用』Verschmelzung。倘若兩音之『融合』程度愈大；則其結果愈易成爲『一個感覺。』是即我們所謂『協和音階。』倘若兩音之『融合』程度愈小。則其結果彼此愈難相結。此種『融合作用，』在吾人『臭覺』及『味覺』中皆常有之。但均不若聲音『融合作用』之甚。

至於『融合作用』程度之大小，則以兩音彼此顫動關係之簡單複雜爲轉移。其次序與前段所述（子）（丑）（寅）（卯）……等等相同。換言之。即（子）之『融合』程度大於（丑）。（丑）又大於（寅）。（寅）又大於（卯）。等等是也。

但是這種『融合作用』之形式究竟如何？這個問題至今尙無滿意答案。（至少我還未聽見。）西洋學者勉强與他取了一個名稱。叫做『特殊合作』Speyifische Synergie.

（五十六）心理上之純音

從前西洋學者常以爲每個『音程』Fntervall之大小。皆當絕對依照物理及數理所規定者爲準。（請參看前面第二十六節。）合此者則謂之爲『純』Rein。不合此者則謂之爲『不純』Unrein。而且此種『不純』之毛病，尤以『協和音階』最易惹人注意云云。此說據最近學者研究。認爲無憑。蓋物理及數理上之所謂『純』與吾人心理上之所謂『純』。並不常常一致。譬如物理及數理上所規定之『純八階』(1:2)，『純五階』(2:3)，『長三階』(4:5)，『短三階』(5:6)。在吾人心理方面每每覺其『不純』。必須略爲增減，始能達到心理上所謂『純』的地步。換言之。『純八階』除物理上所規定之『顫動數』外，還須再加上0.95顫動。（按大約等於一次顫動。）『純五階』則須再加上0.81顫動。『長三階』則須再加上0.43顫動方能達到心理感覺上之所謂『純』。反之。『短三階』在吾人心理方面又嫌物理上所規定者過大。必須減少1.50顫動方可以上所論，皆指中部音級而言。（非指過低或過高之音級而言。）而且兩音係先後發出。（不是同時發出。）凡曾經練習之耳朶。皆可以精細考

察出來。

至於過低或過高之音級。則因聽者爲生理所限制。故其辨別『純』與『不純』之能力。亦復大爲減少也。

（五十七）音之親屬關係

『音之親屬關係』Tonverwandtschaft。可以分爲直接的。與間接的，兩種。前者譬如C與G爲『純五階』。有直接協和關係，是爲『直接親屬』列爲公式則如下。

C . . . G
純五階

後者譬如C與d爲『不協和音階』。但若中間經過G之介紹，則又成爲間接協和關係。是爲『間接親屬』。其式如下。

C . . . G . . . d
純五階　純五階

好像是張王兩家聯姻，成為『直接親屬』。同時王李兩家復有聯姻之誼。其結果張李兩家又成為『間接親屬』。因此之故我們談及李家，便會聯想張家。同樣道理。我們聽見d音便會聯想C音。假如我們依照這種辦法推起下去。可以發生許多『間接親屬』。譬如

C • • • G • • • d • • • a • • • e¹

純五階　純五階　純五階　純五階

等等是也。換言之。C與e¹之間，亦是『間接親屬』。不過隔了三層，只算是一個『遠親』罷了。至於吾人實際上之應用，則僅至第一個『間接親屬』而止。（譬如C—d）。因為其間相隔層數若過多。則非一時聯想之力所能及也。

以上所述皆係『五階親屬』Quintverwandtschaft。是為音樂界中之應用最廣者。（按吾國所謂『隔八相生法』，亦屬於『五階親屬』一類）此外尚有『三階親屬』Terzverwandtschaft，及『五三階親屬』Quint—Terzverwandtshaft 兩種。其式

如下。

（三階親屬）

C・E・♯G
長三階 長三階

（五三階親屬）

C・・・G・H
純五階 長三階

上列第一例，C與E爲『長三階』有直接協和關係。是爲『直接親屬』而C與♯G則爲『不協和音階』。但中間經過E之介紹，又成爲『間接親屬』。第二例C與G爲『純五階』，有直接協和關係，是爲『直接親屬』而C與H則爲『不協和音階』。但中間經過G之介紹，又成爲『間接親屬』。

我們知道。『三階』之協和程度。不及『五階』。因而『三階親屬』及『五三階親屬』之辨認，亦不如『五階親屬』之易。所以實際上之應用較少。

此書係成於民國十五年三月；其後民國十六年七月，復行修改增補一次；王光祈識於柏林。